

LANDESHAUPTSTADT MÜNCHEN
U-BAHNREFERAT

Die geologischen
und hydrologischen Verhältnisse
beim Münchner U-Bahn-Bau

mit 29 Abbildungen, 33 Tabellen, 40 Tafeln und 2 Beilagen

PETER GEBHARDT

1968

Die geologischen
und hydrologischen Verhältnisse
beim Münchener U-Bahn-Bau

von Dr. phil. phil. Dr. phil. Dr. phil. Dr. phil.

Dr. phil. phil. Dr. phil. Dr. phil. Dr. phil.

Dr. phil. phil. Dr. phil. Dr. phil. Dr. phil.
Dr. phil. phil. Dr. phil. Dr. phil. Dr. phil.
Dr. phil. phil. Dr. phil. Dr. phil. Dr. phil.

Dr. phil. phil. Dr. phil. Dr. phil. Dr. phil.

Dr. phil. phil. Dr. phil. Dr. phil. Dr. phil.

Dr. phil. phil. Dr. phil. Dr. phil. Dr. phil.

Dr. phil. phil. Dr. phil. Dr. phil. Dr. phil.

Dr. phil. phil. Dr. phil. Dr. phil. Dr. phil.

Dr. phil. phil. Dr. phil. Dr. phil. Dr. phil.

Dr. phil. phil. Dr. phil. Dr. phil. Dr. phil.

Dr. phil. phil. Dr. phil. Dr. phil. Dr. phil.

Dr. phil. phil. Dr. phil. Dr. phil. Dr. phil.

Dr. phil. phil. Dr. phil. Dr. phil. Dr. phil.

Dr. phil. phil. Dr. phil. Dr. phil. Dr. phil.

Dr. phil. phil. Dr. phil. Dr. phil. Dr. phil.

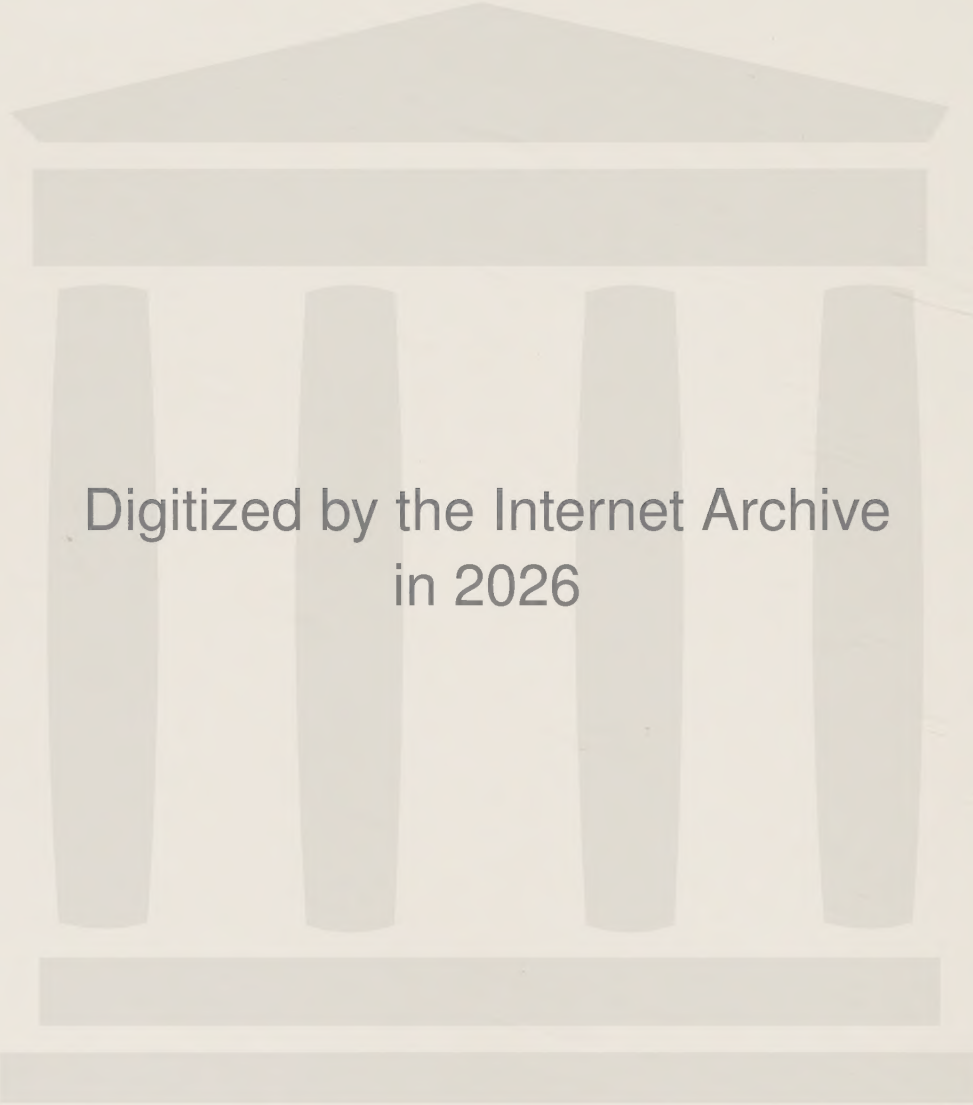
Dr. phil. phil. Dr. phil. Dr. phil. Dr. phil.

Dr. phil. phil. Dr. phil. Dr. phil. Dr. phil.

Dr. phil. phil. Dr. phil. Dr. phil. Dr. phil.

Dr. phil. phil. Dr. phil. Dr. phil. Dr. phil.

Dr. phil. phil. Dr. phil. Dr. phil. Dr. phil.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41555415_0036

Die geologischen
und hydrologischen Verhältnisse
beim Münchner U-Bahn-Bau

mit 29 Abbildungen, 33 Tabellen, 40 Tafeln und 2 Beilagen

Inaugural – Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde der
Hohen Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von
PETER GEBHARDT
München

München, 1968



Als Manuskript gedruckt

1. Berichterstatter: Prof. Dr. F. NEUMAIER
 2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. A. MAUCHER
- Tag der mündlichen Prüfung: 24. 7. 1968

Inhalt

Seite

Zum Geleit

Vorwort

I. Einleitung	1
II. Geologische Verhältnisse	1
1. Paläogeographische und stratigraphische Entwicklung . . .	1
1.1 Tertiär	1
1.2 Quartär	4
2. Die Ablagerung des Quartärs (Altstadtstufe)	7
2.1 Allgemeine Ausbildung	7
2.2 Korngrößenverteilung	8
2.21 Kiese	9
2.22 Sande	9
2.23 Lehme	9
2.3 Petrographie und Kornform	10
3. Die Ablagerungen des Jungtertiärs (Obere Süßwassermolasse)	10
3.1 Allgemeine Ausbildung	10
3.2 Korngrößenverteilung	11
3.21 Untersuchungsmethode und Darstellung	11
3.22 Untersuchungsergebnisse	12
3.3 Petrographie und Kornform	17
3.31 Schotter	17
3.32 Sande und Mergel	17
3.321 Leichtmineralien der Schluff- und Sandfraktion	17
3.322 Leichtmineralien der Tonfraktion	17
3.3221 Differentialthermoanalysen	18
3.3222 Röntgenphasenanalysen	19
3.323 Schwermineralien der Schluff- und Sandfraktion	20
3.4 Karbonatgehalt	22
3.5 Natürlicher Wassergehalt und Bildsamkeitsgrenzen	24

	Seite
3.6 Sedimentgefüge	28
3.61 Schräg- und Kreuzschichtung	28
3.62 Schichtinterne Fältelungserscheinungen	30
3.63 Wühlgefüge	31
4. Lagerungsverhältnisse	32
III. Die Grundwasserverhältnisse	36
1. Allgemeiner Überblick	36
1.1 Wichtige hydrologische Begriffe	36
1.2 Hydrogeologie	37
2. Grundwasserganglinien und Extremwerte	39
2.1 Grundwasserganglinien	39
2.2 Hoch- und Tiefstände	43
2.3 Extreme Schwankungen	45
3. Filtergeschwindigkeiten des Grundwassers	47
3.1 Untersuchungsmethode	48
3.2 Untersuchungsergebnisse	49
3.21 Filtergeschwindigkeiten des Grundwassers im Quartärkies .	49
3.22 Filtergeschwindigkeiten des Grundwassers im Tertiärsand .	51
4. Durchlässigkeitsbeiwerte	54
4.1 Quartäre Sedimente	54
4.11 Bestimmungsmethoden	54
4.12 Untersuchungsergebnisse	55
4.2 Tertiäre Sedimente	56
4.21 Bestimmungsmethoden	56
4.22 Untersuchungsergebnisse	58
5. Grundwasserhöhengleichen und Grundwasserbewegungs- richtung	64
6. Lokale Fließrichtungen des Grundwassers	67
6.1 Untersuchungsmethode	67
6.2 Untersuchungsergebnisse	68
7. Grundwasserchemismus	69
7.1 Einführung in den Stoffbestand des Grundwassers	69

	Seite
7.2	Untersuchungsergebnisse 71
7.21	Obere Grundwasserstockwerke 72
7.22	Tiefere Grundwasserstockwerke 78
7.23	Zeitliche Schwankungen 79
7.3	Beurteilung 81
8.	Grundwassertemperatur 83
8.1	Untersuchungsmethode 83
8.2	Untersuchungsergebnisse 84
IV.	Geotechnische Verhältnisse 86
1.	Angewandte Bauweisen 86
1.1	Offene Bauweise 86
1.2	Bergmännische Bauweise 87
2.	Bautechnische Beurteilung und Klassifizierung der Bodenschichten 89
2.1	Bodenarten und Gesteinsarten des Quartärs 89
2.2	Bodenarten und Gesteinsarten des Tertiärs 90
2.3	Untersuchungsergebnisse 93
3.	Fließerscheinungen in den jungtertiären Sanden 94
4.	Grundwasserabsenkung 96
4.1	Allgemeine Voraussetzungen 97
4.2	Anordnung und Ausbau der Gravitationsbrunnen 100
4.3	Einflußbereich der Absenkungen 101
4.4	Setzungserscheinungen 106
4.5	Erosionserscheinungen 108
4.51	Restwasser in den quartären Kiesen 109
4.511	Erosionserscheinungen bei offener Bauweise 109
4.512	Erosionserscheinungen beim Schildvortrieb 111
4.52	Restwässer in den jungtertiären Sanden 113
4.521	Erosionserscheinungen bei offener Bauweise 113
4.522	Erosionserscheinungen beim Schildvortrieb 115
4.53	Beurteilung und Zusammenfassung 119
4.6	Vakuumwasserhaltung 120

	Seite
4.61 Vakuumgroßbrunnen	120
4.62 Vakuumhorizontalbrunnen	122
4.7 Geförderte Wassermengen	123
4.71 Gravitationsbrunnen	123
4.72 Vakuumgroßbrunnen	126
4.73 Wassermengen der Baulose	127
5. Einfluß des Bauwerks auf die Grundwasserströmung	132
V. Zusammenfassung	135
VI. Literaturverzeichnis	140

Anhang

Verzeichnis der Tafeln

Richtlinien für die Bodenansprache und Darstellung der Ergebnis-
unterlagen

ZUM GELEIT

Das Interesse der Landeshauptstadt München an den hydrogeologischen Verhältnissen im Untergrund des Stadtgebietes geht schon auf das vorige Jahrhundert zurück. So wurden die ersten systematischen und zweckgebundenen Grundwasserstandsbeobachtungen Deutschlands 1856 in München durchgeführt. Auch C.W. von GÜMBEL, einer der bekanntesten Geologen und der Ingenieur A. THIEM, einer der ersten bedeutenden Hydrologen, erforschten in den Jahren 1875-1878 im Auftrage der Stadt München die hydrogeologischen Gegebenheiten des Stadtgebietes in wasserwirtschaftlicher Hinsicht.

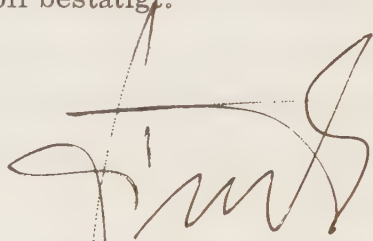
Das erste Projekt einer S-Bahn für München entstand in den zwanziger Jahren dieses Jahrhunderts. Es wurde jedoch infolge des 2. Weltkrieges nicht verwirklicht. Aus den damals von der Reichsbahn 1937/38 sorgfältig durchgeführten Voruntersuchungen stammen wesentliche Kenntnisse über die Münchner Baugrundverhältnisse, denn auch damals wurden die Ergebnisse durch Fachleute ausgewertet.

Als nach dem Krieg die fortschreitende verkehrstechnische Entwicklung in München den Bau einer U-Bahn unumgänglich machte, war das U-Bahn-Referat der Landeshauptstadt München von Anfang an bestrebt, sich in den Fragen der Grundwasserverhältnisse und ihrer Beherrschung beim Bau der U-Bahn-Anlagen die Beratung anerkannter Fachleute der einschlägigen wissenschaftlichen Institute, Ämter und Behörden zu sichern. Die Zusammenarbeit auf breitester Ebene zwischen Professoren, Bauingenieuren, Bautechnikern, Verwaltungsfachleuten, Juristen und Geologen gewährleistet eine optimale Lösung all der Probleme, die das, auch für die heutige moderne Technik, bedeutende Projekt des Münchner U-Bahn-Baues mit sich bringt.

Eine rechtzeitige und umfassende Erkundung der Untergrundverhältnisse und ihre wissenschaftliche Auswertung führt zu repräsentativen und reproduzierbaren Ergebnissen, die der Wirtschaftlichkeit und Sicherheit des Bauvorhabens und nicht zuletzt den wasserrechtlichen Erfordernissen dienen. Die vorliegende Arbeit berichtet über die Erfahrungen und Erkenntnisse der ersten zwei Jahre der U-Bahn-Bauzeit auf diesem Gebiet und wird in ihrer Methodik über München hinaus wegweisend sein.

Welche Bedeutung gerade der hydrogeologischen Erforschung des Untergrundes und der technischen Nutzanwendung beim U-Bahn-Bau zukommt, zeigt sich in der gelungenen Grundwasserabsenkung bei den U-Bahn-Baumaßnahmen, ließ sich doch zum Beispiel allein beim Auffahren der Schildtunnel unter der Ludwig-/Leopoldstraße anstelle des sonst notwendigen Einsatzes von Druckluft pro km Doppeltunnel eine Einsparung von ca. 2.3 Mio DM erzielen.

Und nicht zuletzt beweist diese, von der Hohen Naturwissenschaftlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München mit "sehr gut" bewertete Arbeit, daß einer exakten naturwissenschaftlichen Durchdringung des Stoffes der Vorzug vor anderen Betrachtungsweisen gebührt, denn die Erfahrungen und die Nutzanwendung an unseren ca. 15 km langen U-Bahn-Baustellen haben die wissenschaftlichen Voraussagen und Erkenntnisse voll bestätigt.



Dr. Klaus Zimniok
Berufsmäßiger Stadtrat
U-Bahn-Referent der
Landeshauptstadt München

VORWORT

Seitdem die Landeshauptstadt München die U-Bahn plant und baut, sind hydrogeologische Arbeiten längs der vorgesehenen Trassen und im Bereich der einzelnen Baustellen im Gange. Eine Fülle von geologischen und hydrologischen Daten sind dabei angefallen, und es galt sie zu sammeln und auszuwerten. Fortschreitend war es dann meine Aufgabe, die geologischen und hydrologischen Folgerungen aus dem reichen Tatsachenmaterial zu ziehen und zu zeigen, welche Erfahrungen auf Grund der auftretenden geotechnischen Probleme gewonnen wurden.

Herrn Professor Dr. F. NEUMAIER, der mir das Thema dieser Arbeit stellte, bin ich für seine Hilfe verbunden. Herrn Dr. K. ZIMNIOK, berufsmäßiger Stadtrat, U-Bahn-Referent der Landeshauptstadt München, möchte ich herzlich danken für das rege Interesse, mit dem er den Fortgang meiner hydrogeologischen Arbeit verfolgte.

Herrn Regierungsbaudirektor J. HOFBAUER, Bayerische Landesstelle für Gewässerkunde, München, Herrn Oberbaurat G. HOLLROTTER und Herrn Oberbaurat H. SIPPEL, U-Bahn-Referat München, bin ich besonders verpflichtet für ihre freundliche Unterstützung.

Es lag in der Natur dieser Arbeit, daß ich bei vielen Stellen Kontakt suchen mußte. Es sei nur erlaubt, zusammenfassend den nachstehenden Förderern meiner Arbeit, stellvertretend für viele andere, zu danken:

Herrn Professor Dr. R. DEHM, Herrn Dr. H.K. ZÖBELEIN, Institut für historische Geologie und Paläontologie der Universität München, Herrn Notar H. MODELL, Weiler im Allgäu, Herrn Dr. W.D. GRIMM, Wiss. Rat, Freie Universität Berlin, Herrn Dr. H. BATSCHE und Herrn Dipl. Phys. W. DROST, Institut für Radiohydrometrie, München, Herrn Dr. J. EXLER, Bayerisches Geologisches Landesamt, Herrn Dipl. Geol. H. HELLERER, Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Hochschule München, Herrn Dipl. - Geol. K. CRAMER und Herrn Ing. R. EVERMANN, Bayerische Landesstelle für Gewässerkunde, Herrn Z. BEYWL, Baureferat, Gruppe Tiefbau, Abteilung Stadtentwässerung.

Mein aufrichtiger Dank gilt weiterhin allen Bauleitern, Ingenieuren, Kontrollmeistern und Arbeitern des U-Bahn-Referats, der Ingenieurbüros und der Bau- und Bohrfirmen, die durch ihr freundliches Entgegenkommen ebenso wesentlich zum Gelingen der Arbeit beitrugen, wie der Gedankenaustausch mit meinen Studienkollegen R. APPEL, H. v. BERCHEM, R. HEROLD, G. MEIER, E. SCHIRM und J. -P. WROBEL.

I. Einleitung

Die Landeshauptstadt München baut seit 1965, unterstützt vom Freistaat Bayern und der Bundesrepublik Deutschland, eine Untergrundbahn. Zuerst wurde mit der sogenannten "Nord-Süd-U-Bahnlinie" begonnen; ihr Bau wurde am 29.1.1964 vom Stadtrat der Landeshauptstadt beschlossen. Mit dem Bauabschnitt 1 zwischen Schenkendorfstraße und Stengelstraße begann am 1.2.1965 der Münchner U-Bahn-Bau.

Die über 15 km lange Nord-Süd-U-Bahnlinie führt von Freimann, im Norden der Stadt, unter der Ungerer-, Leopold-, Ludwigstraße unter dem Marienplatz, dem Sendlinger-Tor-Platz bis zum Harras im Südwesten der Stadt (Tafel 1, Beilage 1). Inzwischen hat auch die Bundesbahn mit dem Bau einer 4,2 km langen S-Bahn zwischen Hauptbahnhof und Ostbahnhof begonnen (Tafel 1).

Schließlich wurde eine ca. vier Kilometer lange Stichlinie - die "Olympialinie" - von der Münchner Freiheit bis zu dem zukünftigen Olympiagelände auf dem Oberwiesenfeld als U-Bahn projektiert (Tafel 1, Beilage 2), an der seit 1967 gebaut wird.

Die vorliegende Arbeit wurde mit Unterstützung des U-Bahn-Referates im Oktober 1965 begonnen und im März 1968 vollendet.

II. Geologische Verhältnisse

1. Paläogeographische und stratigraphische Entwicklung

Im Untergrund des Stadtgebietes München stehen, wie die tiefsten Brunnenbohrungen (bis 240 m) zeigen, Schichten zweier geologischer Formationen an: zuoberst liegen Sedimente des Quartärs, darunter folgen Ablagerungen des Tertiärs.

1.1 Tertiär

Im Tertiär wurde das Süddeutsche Molassebecken mit dem Abtragungsschutt der aufsteigenden Alpen aufgefüllt, indem eine wiederholte Abfolge mariner, brackischer und limno-fluvialer Sedimente zur Ablagerung kam.

Der tiefere Untergrund im Alpenvorland ist durch Erdölbohrungen bekannt geworden. Einen Eindruck von der Mächtigkeit der tertiären Sedimente vermittelt z.B. die Bohrung Landsham 1 ^{†)}, die etwa 15 km nordöstlich von München abgeteuft wurde:

Hier wurden unter einer ca. 21 m mächtigen, quartären Überlagerung 375 m Mergel, Sande und Kiese der Oberen Süßwassermolasse erbohrt. Die Tertiärbasis wurde erst nach einer Wechselfolge von marinen und brackischen Schichten (Sande, Mergel, Sandsteine, Tonmergel, Mergelkalke) in einer Teufe von 2204.4 m erreicht. Die Bohrung endete bei 2210.6 m in oberkretazischen Sedimenten. Nach den Ergebnissen anderer Erdölbohrungen werden zwischen dem Kristallin und dem in der Bohrung erschlossenen Tertiär noch ca. 600 m vor-tertiäre Schichten vermutet.

Beim Münchner U-Bahn-Bau wurden, abgesehen von der quartären Überlagerung, nur Schichten des Jungtertiärs (Obere Süßwassermolasse) erfaßt (Abb. 1). Diese Sedimente sind in Baugruben und an wenigen Stellen längs der Isar natürlich aufgeschlossen.

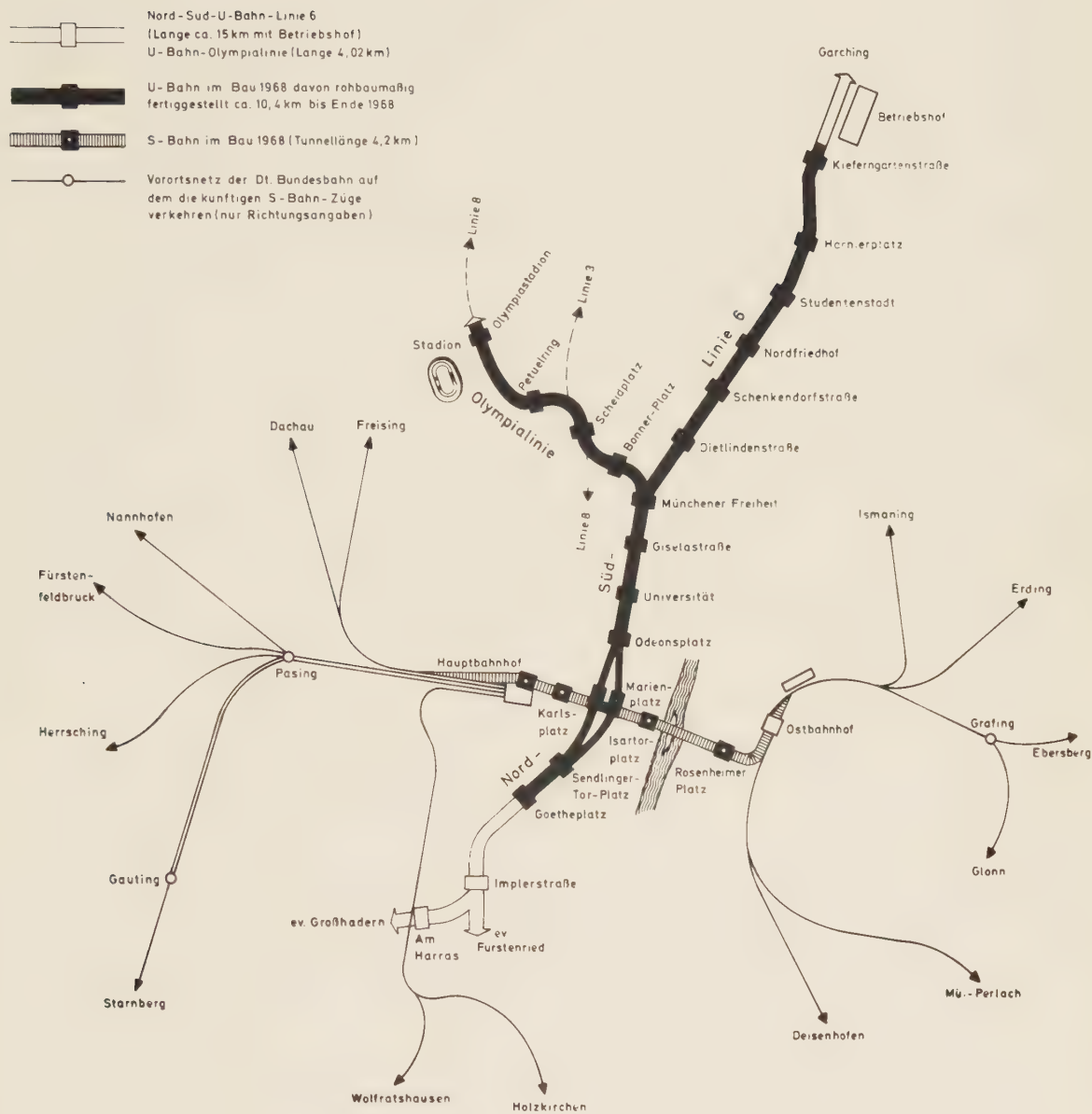
BEGINN VOR ca.	ABT.	STUFE	UNTERSTUFE	SCHICHTGLIED, AUSBILDUNG		NACH DEHM (1955)	WICHTIGSTER FOSSILINHALT
12 MIO. JAHREN	JUNG-TERTIÄR	OB PLIOZAN	PONT	OBERE SUSSWASSERMOLASSE		JUNGERE SERIE	MASTODON LONGIROSTRIS DINOTHERIUM GIGANTEUM ACERATHERIUM MASTODON AFF LONGIROSTRIS DINOTHERIUM AFF GIGANTEUM
		OBER- MIOZÄN	SARMAT			MITTLERE SERIE	DINOTHERIUM BAVARICUM MASTODON ANGUSTIDENS SUSSWASSER MOLLUSKEN
			TORTON	SBM	SANDE, UNTERGEORDNET TON- UND KALKMERGEL	ÄLTERE SERIE	MOLLUSKEN MASTODON ANGUSTIDENS
17 MIO. JAHREN							
NACH ÄLTEREN AUTOREN UND EIGENEN ERGEBNISSEN				 = SCHICHTLÜCKE		SBM = SUSSBRACKWASSERMOLASSE	

Abb. 1 Stratigraphie des Jung-Tertiärs

Diese jungtertiären Ablagerungen der Oberen Süßwassermolasse sind limno-fluviatile Aufschüttungen; ihr Material stammt zum überwiegenden Teil aus den Alpen. In Schwemmfächern und Flußrinnen wurde klastisches Material, - Sande und untergeordnet auch Schotter, - abgelagert, während die schluffig-tonigen Sedimente im Überschwemmungs- und Totwasserbereich der Flußauen oder in Seen abgesetzt wurden.

^{†)} DEA 1959, Geol. Bearbeitung Dr. K. GÖTZINGER

Baufortschritt U- und S-Bahn in München



Tafel 1 Steckentübersichtsplan der Münchner U-Bahn, der S-Bahn (früher V-Bahn) und des Vorortzugnetzes der Deutschen Bundesbahn. Stand März 1968 (nach ZIMNIOK, JOAS u. SARKÖZY 1967)

DEHM (1955) klärte auf Grund fossiler Säugetierfaunen die Altersbeziehungen in der Oberen Süßwassermolasse. Er unterschied in der Schichtfolge eine "Ältere", "Mittlere" und "Jüngere Serie", die, wie geologische Arbeiten in Ostniederbayern ergaben, z. T. durch Schichtlücken voneinander getrennt sind. STROMER (1928, 1937, 1938 und 1940) beschrieb Fossilfunde, die am linken Isarufer in der Nähe des Aumeisters und an einer Fundstelle in der Ingolstädterstraße geborgen worden waren. Diese Fossilien entsprechen in ihrer Altersstellung der "Mittleren" und "Jüngeren Serie" nach DEHM (1955). Für die beim U-Bahn-Bau bisher erschlossenen Mergel und Sande ergaben Süßwassermollusken ein sarmatisches Alter. Herr Notar MODELL, der freundlicherweise die Nayaden bestimmte, betont, daß "die Nayaden der Säugerfundsichten STROMERs am Aumeister, die STROMER als tiefstes Pliozän bezeichnete (im Vergleich zu den beim U-Bahn-Bau gefundenen Nayaden) andersartig und von pliozänem Charakter waren". Die Gastropoden wurden von Herrn Dr. H.K. ZÖBELEIN, München, bestimmt. Die bisher beim U-Bahn-Bau erschlossenen Schichten entsprechen also in ihrer Altersstellung wahrscheinlich dem Nördlichen Vollschoffer Niederbayerns (Torton - Sarmat).

Die Fossilfundpunkte der U-Bahn-Baustelle sind in Abbildung 15 (S. 33) eingezeichnet. Im einzelnen waren bestimmbar:

Margaritifera flabellata carinthiaca	(MODELL)	}	Sarmat
Margaritifera flabellata bavarica	(MODELL)		
Tropidomphalus c.f. zelli	(KURR)	}	Torton-Sarmat
Tropidomphalus c.f. incrassatus	(KLEIN)		

Neben diesen artenarmen, aber individuenreichen Molluskenfaunen wurden auch Rhinozeriden-Knochen, vermumte oder inkohlte Lignitreste (z. T. abgerollt) und unbestimmbare Pflanzenabdrücke gefunden.

Wie geologische Arbeiten im niederbayerischen Tertiärhügelland ergaben, bestand im Obertorton-Sarmat eine ausgedehnte Seen- und Flußlandschaft mit subtropisch warmen Klimaverhältnissen. Breite, häufig mäandrierende und langsam strömende Flüsse, Totwasserarme und Seen waren vorherrschend. Flußbegleitende, sommer- und immergrüne Auwälder und trockene Buschsteppen bestimmten das Landschaftsbild. In dem unruhigen limno-fluviatilen Milieu wurden die Sande und Mergel der Oberen Süßwassermolasse abgelagert.

Die örtlich wechselhaften und unterschiedlichen Transport-, Ablagerungs- und Umlagerungsbedingungen erklären den raschen, vertikalen und horizontalen Fazieswechsel der tertiären Sedimente. Noch während der jungtertiären Aufschüttungsphase kam es zu kürzeren oder längeren, oft rein lokalen Sedimentationspausen, in denen teilweise schon abgelagertes Material wieder erodiert und umgelagert wurde (vgl. II, 4). Die großen Flußsysteme dieser Zeit waren überwiegend Ost-West gerichtet und gehörten zu den "axialen" Schüttungen im Süddeutschen Molassebecken im Sinne FÜCHTBAUERS (GRIMM 1965).

Die letzten Schüttungen erfolgten, wie schon erwähnt, auch im Bereich des Stadtgebietes, im Unterpliozän (STROMER 1938). Dann endete die jungtertiäre Sedimentation im Molassebecken. Das Gebiet wurde gehoben und damit der Abtragung ausgesetzt. Bis zur quartären Aufschüttungsphase legt die Erosion ein ausgeprägtes Relief an (Beilage 1, III).

Die aus der westlichen und östlichen Alpenvorlandsmolasse bekannte Sedimentationslücke vor der Wende Miozän-Pliozän ließ sich bisher an den beim U-Bahn-Bau aufgeschlossenen Ablagerungen nicht nachweisen. Die Schichten des Unterpliozäns wurden wahrscheinlich zum Teil erodiert und scheinen heute nur noch an wenigen Stellen als Relikte erhalten zu sein.

1.2 Quartär

Die heutige Oberflächengestalt im Alpenvorland entstand im Quartär. Im Diluvium (Pleistozän) rückten Gletscher in Kaltzeiten in mehreren Vorstößen aus den Alpen vor und verfrachteten alpinen Schutt weit hinaus ins Vorland. Mehrere Moränengürtel belegen die verschieden alten Eisvorstöße und Stillstandszeiten im glazialen Bereich (Abb. 2). Durch die Stirn dieser Schuttwälle gruben sich die Schmelzwässer Abflüsse ins eisfreie Vorfeld und lagerten hier im fluvioglazialen Bereich ihre Geröllfracht in großen Schwemmkegeln ab. Teils füllten die Schottererschüttungen das vorhandene Relief auf, teils gruben sie sich in die Tertiäroberfläche ein. Die jüngeren pleistozänen Schotterfächer schlossen sich zur Münchner Schotterebene zusammen.

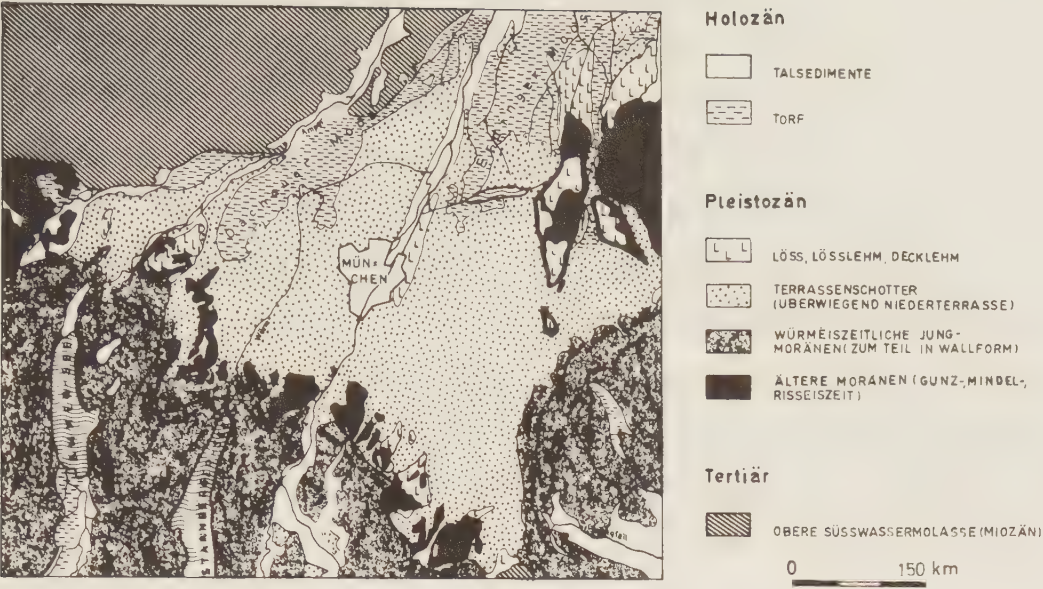


Abb. 2 Übersicht nach der geologischen Karte von Bayern (Bayer. Geol. Landesamt, München 1964)

Nach AMMON (1894), KNAUER (1938) , KRAUS (1964), PENK u. BRÜCKNER (1909), SCHAEFER (1951) u.a. lassen sich fünf große Vereisungsperioden unterscheiden, von denen jede wieder verschiedene Akkumulationsperioden aufweisen kann (Abb. 3).

BEGINN VOR ca.	ABTEILUNG	STADIAL	SCHICHTGLIEDER UND AUSBILDUNG
8 000 JAHREN	HOLOZÄN (ALLUVIUM)	POSTGLAZIAL	(ISAR-) SCHOTTER , AULEHME , SUBHYDRISCHE BILDUNGEN
100 000 JAHREN	JUNG - PLEISTOZÄN	(SPÄTGLAZIAL) WÜRM-EIS- ZEIT RISS/WÜRM INTERGLAZIAL	SCHOTTER DER ALTSTADTSTUFE , LÖSS , LEHME SCHOTTER DER NIEDERTERRASSE , LÖSS , LÖSSLEHME , JUNG MORÄNE VERWITTERUNGSLEHME
	MITTEL - PLEISTOZÄN	RISS -EISZEIT MINDEL/RISS-INTERGLAZIAL	HOCHTERRASSE , LÖSS , LÖSSLEHME , ALTMORÄNE VERWITTERUNGSLEHME
	ALT - PLEISTOZÄN	MINDEL-EISZEIT GÜNZ/MINDEL-INTERGLAZIAL GÜNZ-EISZEIT	JÜNGERE DECKENSCHOTTER , MORÄNE , LÖSS VERWITTERUNGSLEHME ÄLTERE DECKENSCHOTTER , MORÄNE , LÖSS , LÖSSLEHME
1 000 000 JAHREN	ÄLTEST - PLEISTOZÄN	MEHRERE DURCH WARMZEITEN GEGLIEDERTE DONAU KALTZEITEN	
Nach Brückner, Brunnacker, Knauer, Kraus, Penk, Schaefer u.a			

Abb. 3 Stratigraphie des Quartärs (nach BRÜCKNER u. PENK 1909, BRUNNACKER et al. 1964, KRAUS 1964, SCHAEFER 1951 u.a.)

Die Lagerungsverhältnisse im Stadtgebiet von München werden anschaulich durch ein West-Ostprofil (nach MÜNICHSDORFER (1922)) wiedergegeben. Dieses Blockbild, das ursprünglich von SCHUSTER nach Angaben von MÜNICHSDORFER gezeichnet wurde, ist in der Abbildung 4 geringfügig geändert: unter den Schottern der Altstadtstufe ist der Hochterrassenschotter nach den bisherigen Befunden nicht als durchgehende Schicht nachweisbar. Er kommt wohl nur stellenweise als Relikt unter der Altstadtstufe vor.

Beim U-Bahn-Bau zwischen Freimann und Sendlingertorplatz wurden bisher nur die Schotter der Altstadtstufe angeschnitten, sie entsprechen nach BRUNNACKER (1964) einem Rückzugsgehalt der würmeiszeitlichen Gletscher (Abb. 3) .

Im Holozän schüttete die Isar die jüngste alluviale Terrasse auf und tiefte sich dann in historischer Zeit, durch künstliche Maßnahmen bedingt, zum Teil bis ins Tertiär wieder ein. In diesem Zusammenhang sei auch darauf hingewiesen, daß die quartären Schotter im Stadtgebiet, zumindest soweit sie durch den U-Bahn-Bau bisher erschlossen wurden, durch Baumaßnahmen (Kanalbau u. a.) bis in Tiefen zwischen 3 und 6 m umgelagert sind.

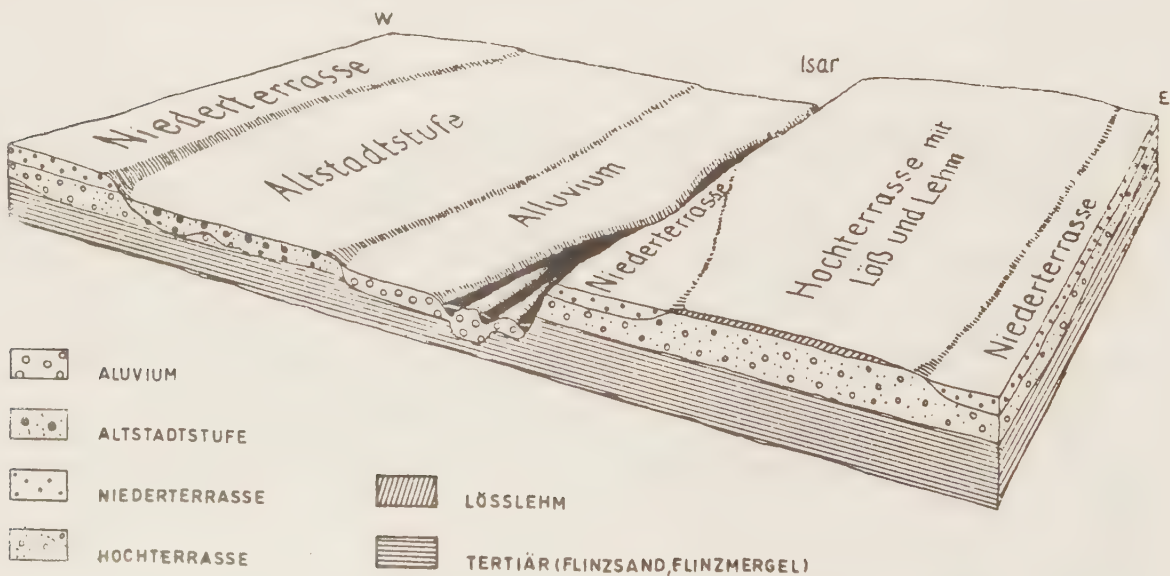


Abb. 4 Geologisches Blockbild: West-Ost-Profil durch das Stadtgebiet von München zwischen Theresienhöhe und Berg am Laim (nach MÜNICHSDORFER 1922)

2. Die Ablagerungen des Quartärs (Altstadtstufe)

2.1 Allgemeine Ausbildung

Das Quartär besteht längs der U-Bahn-Trasse zum überwiegenden Teil aus Grobschottern, die massig gelagert und nur gelegentlich undeutlich horizontal- oder schrägschichtet sind. In der Regel handelt es sich um graue bis bräunliche Kiese. Konglomeratartige Verbackungen sind bisher in der Altstadtstufe nicht nachgewiesen. Häufig erscheinen im quartären Vertikalprofil Riesellagen; hier fehlt im Kies das sandige Zwischenmittel, der sonst massige Grobkies wird zum Rollkies. Die Riesellagen sind bevorzugte Wasser- oder Luftwege; sie sind meist durch Mangan- oder Eisenoxyde rostbraun bis braunschwarz verfärbt.

Die Mächtigkeit der quartären Grobkiese der Altstadtstufe schwankt im Durchschnitt zwischen 3 und 7 m, nur vereinzelt erreichen die Grobschotter lokal Mächtigkeiten bis zu 15 m. Die unteren Partien dieser Schotter enthalten häufig aufgearbeitetes Material des Tertiärs (Abb. 5).

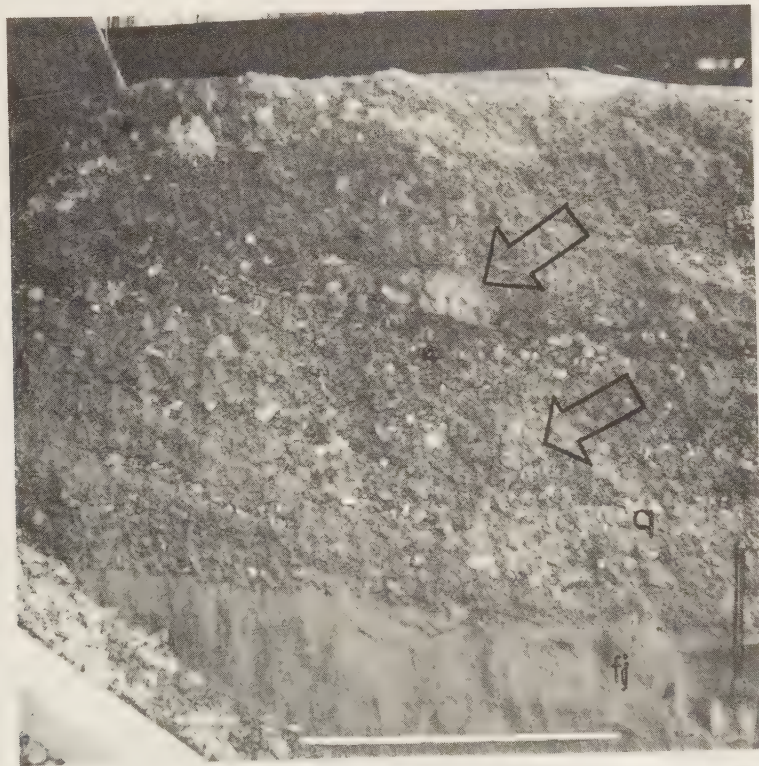


Abb. 5 Grenze Quartär/Tertiär im Baulos 7, Bahnhof Odeonsplatz (die Pfeile bezeichnen Mergel- und Mergelsteingerölle aus tertiärem Material. - Quartär = q, Jungtertiär = tj).

Nur selten sind in den Schottern geringmächtige, z.T. schräggeschichtete Sand-, Lößlehm- oder Schwemmlahmlagen zu finden. Sie sind meist gelblichbraun und fossilführend. Ihre Ausdehnung ist jedoch gering; es handelt sich nur um örtliche Einschaltungen.

2.2 Korngrößenverteilung

Zur Bestimmung der Korngrößenverteilung der quartären Kiese wurden Kübelproben (10 l) entnommen und trocken ausgesiebt. Die Korngrößenverteilung der Sande (Einwaage 400 g) wurde durch Naßsiegung, die der Schluffe (Einwaage 50 g) durch die Sieb- und Schlämmanalyse nach CASAGRANDE (SCHULZE-MUHS 1950) ermittelt. Die Ergebnisse sind in Summenkurven dargestellt, die zu Körnungsbändern zusammengefaßt wurden (Abb. 6). Als Korngrößenklassifikation diente die in der Bautechnik übliche Einteilung nach DIN 4022. Daneben zeigen die Diagramme auch die aus der Geologie und der Bodenmechanik bekannten Klassifikationen nach v. ENGELHARDT (FÜCHTBAUER 1959) bzw. nach dem US-BUREAU OF SOILS (TERZAGHI u. PECK 1961). Die Bezeichnung der Gesteine im Text richtet sich nach der DIN 4022, sofern es nicht ausdrücklich anders angegeben wird.

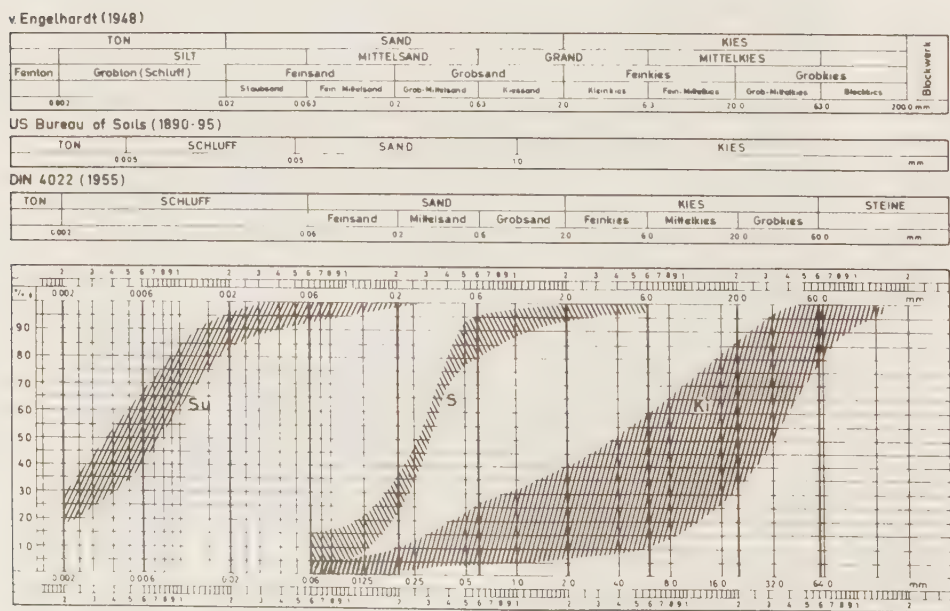


Abb. 6 Korngrößenverteilung der Ablagerungen im Quartär (Altstadtstufe)

2.21 Kiese

Wie die Abbildung 6 zeigt, handelt es sich bei Quartärkiesen (Ki) um schlecht sortierte (Ungleichförmigkeitsgrad 10 bis 55) Fein- bis Grobkiese mit Steinen und mit einer schwach sandigen bis stark sandigen Beimengung. Die Kornkennzahlen sind in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1 Kornkennzahlen der quartären Kiese (Altstadtstufe)

Su	S	fKi	gKi	d ₅₀	d ₁₀	U	Maximalgeröll	
							mittl. Ø ⁺)	längste Achse
%	%	%	%	mm	mm		mm	mm
10	7-	5-	15-	4-	0.07	10-	90-	180-
(-20)	38	20	50	32	-1.9	55	150	270

⁺) Mittlerer Gerölldurchmesser = Geom. Mittel der 3 Geröllachsen

2.22 Sande

Die selten auftretenden quartären Sande (S) sind schwach grobsandige bis grobsandige Fein- und Mittelsande mit einem schwachen Feinkiesgehalt (Abb. 6). Der Ungleichförmigkeitsgrad schwankt zwischen 2.8 und 15, er liegt im Mittel aber bei 3.5. Die Sande sind also im allgemeinen gleichförmig. Der Schluffanteil beträgt zwischen 6 und 14 %. Schluffanteile über 8 % sind, ebenso wie bei den Kiesen, meist durch lokale oder horizontartige Verlehmungen bedingt.

2.23 Lehme

Vereinzelt liegen in den quartären Ablagerungen auch tonige, schwach sandige bis sandige Schluffe (Su) (Abb. 6). Ihr Tongehalt (< 0.002 mm) beträgt zwischen 17 und 28 %, ihr Sandgehalt zwischen 5 und 16 %. Der Kalkgehalt in diesen Feinsedimenten ist sehr hoch (bis 90 %).

Die Tonfraktion enthält in der Hauptsache Kalzit, untergeordnet auch Quarz und Dolomit, wie sich dies auch durch die Röntgenphasenanalyse feststellen läßt (Abb. 11, S. 20). Das Verhältnis Kalzit zu Dolomit verhält sich nach der Röntgenphasenanalyse ungefähr wie 3 : 1. Tonminerale (Montmorillonit, Chlorit, Kaolinit) lassen sich nicht sicher nachweisen.

2.3 Petrographie und Kornform

Die quartären Schotter bestehen in der Hauptsache aus gut gerundeten Kalkgeröllen, nur untergeordnet erscheinen Quarz-, Kristallin- und Sandsteingerölle. Auch bei den Sanden und Schluffen überwiegt das karbonatische Material. Nur wenn die quartären Schotter aufgearbeitetes Tertiärmaterial enthalten, wird die Zusammensetzung des Zwischenmittels quarzreich und glimmerhaltig.

3. Die Ablagerungen des Jungtertiärs (Obere Süßwassermolasse)

3.1 Allgemeine Ausbildung

Die jungtertiären Ablagerungen im Untergrund von München werden wegen ihres augenfälligen Glimmergehalts (im Volksmund: "Flinserln") schon seit altersher ganz allgemein als Flinz bezeichnet. Nach ihrer Ausbildung werden Flinzsand, Flinzmergel und Flinzton unterschieden. Zwischen den Endgliedern Sand und Ton gibt es je nach Korngröße und Kalkgehalt alle nur möglichen Mischungsverhältnisse. Die bergfeuchten Flinzmergel und Flinzsande sind in der Regel grünlichgrau bis graublau. Untergeordnet treten in den Sanden auch Einlagerungen von Schottern auf. Bei den Schottern handelt es sich entweder um geringmächtige Linsen oder um Aufarbeitungslagen mit Mergelgeröllen, Kalkkonkretionen und Molluskenschill.

Durch diagenetische oder deszendente Lösungen können die tertiären Sedimente unregelmäßig in bestimmten Zonen zu Mergelstein oder Sandstein, je nach der Korngröße des Ausgangsmaterials, verfestigt sein. Im Flinzmergel treten häufig weißlich-graue, manchmal dolomithaltige Kalkkonkretionen auf. Ihre Durchmesser liegen unter 200 mm.

Stellenweise, meist in den oberen 1 bis 2 m, unter innertertiären Erosionsdiskordanzen zeigt der Flinzmergel die sogenannte Bröckelstruktur. Das schluffig-tonige Sediment ist von einer Unzahl kleiner und kleinster Bruchflächen unregelmäßig durchsetzt und zerbröckelt bei der Probennahme leicht. Auch Klüfte und Harnischflächen sind in diesen Bereichen im Flinzmergel keine Seltenheit.

Die Sande sind häufig, besonders in den gröberen und daher wasserwegsameren Lagen, durch Brauneisenausfällungen aus dem Grundwasser verfärbt. Ähnliche Verfärbungen finden sich auch im Flinzmergel auf den schon erwähnten Klüften und Harnischflächen.

3.2 Korngrößenverteilung

3.21 Untersuchungsmethode und Darstellung

Die Sande und Kiese wurden nach der Trocknung in einer elektrischen Schüttelmaschine naß ausgesiebt (Dauer 15-20 Minuten). Die Schüttelfrequenz wurde während des Siebvorganges mehrmals geändert. Die Einwaage der Sande betrug 200 g, die der Kiese 8 bis 10 kg. Bei den Sanden wurden Kalkkonkretionen und verbackenes Material größer als 2 mm vor der Siebung entfernt.

Die Schluffe und Tone wurden nach ihrer Trocknung (50°C) vorsichtig zerkleinert, aufgeschlämmt, mehrere Stunden lang geschüttelt und ihre Kornverteilung durch die kombinierte Sieb-Schlämmanalyse nach CASAGRANDE (SCHULZE-MUHS 1950) bestimmt. Zum Teil wurde das Material vor der Schlämmlung mit 20proz. Wasserstoffperoxyd vorbehandelt. Das Peroxyd wurde vor der Analyse wieder durch Erhitzen aus dem Sediment entfernt. Die Einwaage betrug 20 oder 50 g, als Dispersionsmittel wurde 0.01 normale Natriumpyrophosphatlösung verwendet.

Als Korngrößenklassifikation diene die übliche Einteilung nach DIN 4022. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt einmal in Körnungsbändern (Abb. 7), die durch die Grenzkurven der Extremwerte der Summenkurven gegeben sind. Zum andern sind die Analysenergebnisse in der Dreiecksdarstellung der Abbildung 8 wiedergegeben. Das Dreiecksdiagramm (Abb. 8) enthält drei Großfelder, die durch die Mittelsenkrechten (50 %) im Dreieck abgegrenzt werden und die den Hauptbodenarten nach der DIN 4022 entsprechen:

Sand	0.060 - 2.000 mm
Schluff	0.002 - 0.060 mm
Ton	< 0.002 mm

Bei gemischten Bodenarten werden die Beimengungen nach DIN 4022 bezeichnet:

< 15 %:	schwach sandig, schwach schluffig oder schwach tonig
15 - 30 %:	sandig, schluffig oder tonig
30 - 50 %:	stark sandig, stark schluffig oder stark tonig

Die 15 % und 30 % Linien sind im Dreiecksdiagramm eingetragen, so daß die entstandenen Felder die nach der DIN-Norm 4022 zu unterscheidenden Bodenarten wiedergeben. Die Ergebnisse der Korngrößenuntersuchungen der sandig-mergeligen Sedimente wurden als Punkte eingetragen und mit einem Einheitskreis prozentual ausgezählt.

3.22 Untersuchungsergebnisse

Bei den tertiären Kiesen handelt es sich, wie die Abbildung 7 zeigt, um ungleichförmige, stark sandige Fein- und Mittelkiese. Ihre Kornkennzahlen sind in der Tabelle 2 wiedergegeben.

Tabelle 2 Kornkennzahlen jungtertiärer Kiese

Su %	S %	fKi %	gKi %	d ₅₀ mm	d ₁₀ mm	U = d ₆₀ /d ₁₀
< 5	37-43	ca. 20	0-10	3.4-5.0	0.09- 0.125	64-67

Die Vielzahl der nichtkiesigen Bodenarten zeigt deutlich das breite Körnungsband der Abbildung 7. Alle nur denkbaren Übergänge zwischen Ton, Schluff, Feinsand und Mittelsand sind möglich. Auch die Dreiecksdarstellung der Abbildung 8 läßt die fließenden Übergänge zwischen Sand und Schluff erkennen. Außerdem zeigt sich hier, daß bei den sandigen und schluffigen Sedimenten ganz bestimmte Bodenarten vorherrschend sind.

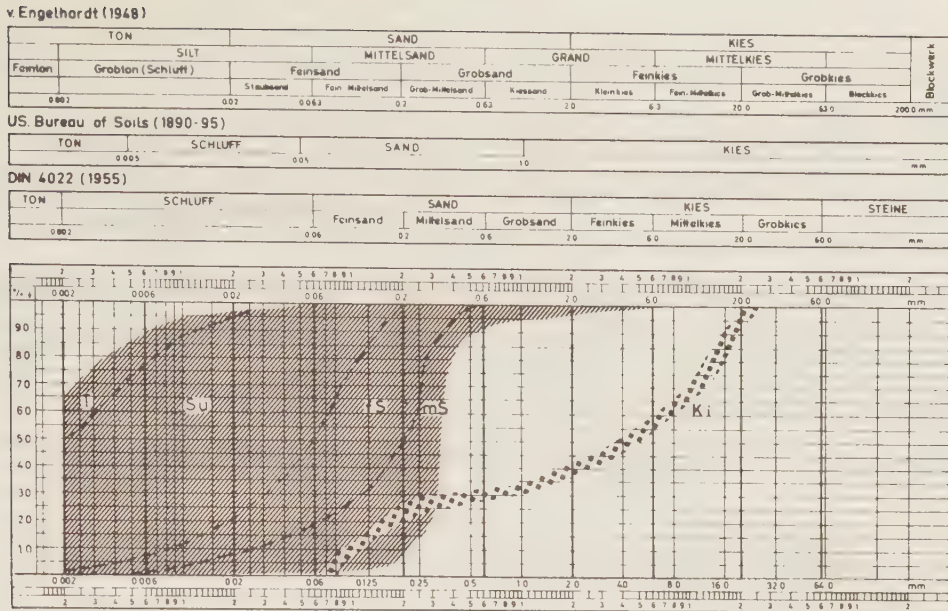


Abb. 7 Korngrößenverteilung der jungtertiären Sedimente

Reine Flinttone (< 0.002 mm) sind relativ selten; soweit sie auftreten, handelt es sich um schwach sandige bis sandige, schluffige bis stark schluffige Tone. Hier ist jedoch zu beachten, daß die Seltenheit des Auftretens von Tonen möglicherweise durch die Analysenmethode bedingt ist. Die Feststellung der Korngrößenverteilung von Tonen (< 0.002 mm) hängt weitgehend von der Vorbehandlung des Probenmaterials ab. Gerade bei der Aräometermethode, wie sie bei bautechnischen Untersuchungen meist üblich ist, sind die Fehlerquellen bei der Untersuchung von Materialien, die einen großen Anteil der Körnungen unter 0.002 mm aufweisen, erheblich.

Der Schluffbereich ($0.002 - 0.06$ mm) ist im Dreiecksdiagramm fast vollständig belegt, d.h. die Zusammensetzung der schluffigen Bodenarten streut stark und es tritt fast jede Mischungsmöglichkeit zwischen schwach bis stark tonigen und schwach bis stark sandigen Schluffen auf. Betrachtet man die Häufigkeit, mit der die einzelnen Typen des Schluffes auftreten, so ergeben sich für den Flinzmergel im wesentlichen sechs Ausbildungsarten:

$Su, s', \bar{t}$ Schluff, schwach sandig, stark tonig

Su, s', t'

Su, s, t' Schluff, schwach sandig - sandig,
schwach tonig - tonig

Su, s', t

$Su, \bar{s}, t'$

Su, s', t' Schluff, stark sandig, schwach tonig

Da sich die Ton- und Sandgehalte des Flinzmergels ohne Korngrößenanalyse nur ungenau schätzen lassen, müssen vier der Ausbildungsarten des Flinzmergels in der Praxis zusammengefaßt werden (siehe S. 13). Die stark sandigen Schluffe dagegen unterscheiden sich von ihnen. Es handelt sich um Grobschluffe mit einem meist deutlichen Feinsandgehalt, die, wie schon erwähnt, in der geologischen Sedimentnomenklatur nach v. ENGELHARDT (FÜCHTBAUER 1959) den "Staubsanden" entsprechen. Auch die stark tonigen Schluffe sind auszugliedern. Möglicherweise handelt es sich hierbei zum Teil um Tone (vgl. S. 13).

Tabelle 3 · Kornkennzahlen jungtertiärer Schluffe

Bodenart	T %	S %	d ₅₀ mm	d ₁₀ mm	$U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$
Su, s , t	> 30	< 5	bis 0.006	-	-
Su, s , t	7-14	2-14	0.011- 0.017	0.002- 0.003	6.0-11
Su, s , t	3-12	15-28	0.017- 0.032	0.0017- 0.0060	6.6-16
Su, s , t	15-27	2- 6	0.006- 0.011	-0.0014	5.0-12
Su, s , t	15-20	15-20	0.0015- 0.0017	-0.0014	17
Su, s , t	2- 7	15-48	0.040- 0.055	-0.009	4.5-7.0

Auch der durch diagenetische Verfestigung entstandene Mergelstein entspricht nach seiner Korngrößenverteilung dem Su, s' - s, t' - t oder seltener dem Su, $\bar{s}$, t'.

Der Sandbereich (0.06 bis 2.0 mm) ist in der Dreiecksdarstellung nur knapp zur Hälfte belegt. Trotzdem weisen die Sande eine unterschiedliche Zusammensetzung auf: ihr Körnungsfeld reicht von schwach tonigen, schwach schluffigen Sanden bis zu tonigen, stark schluffigen Sanden. Deutlich treten zwei Häufigkeitsmaxima im Sandfeld in Erscheinung (Abb. 8). Um die Korngrößenverteilung der Sande noch besser zu kennzeichnen, wurden die Ergebnisse der Analysen in einem eigenen Diagramm für die Sande gesondert dargestellt (Abb. 9). Auch hier treten dann, ähnlich wie im Schluffbereich, mehrere Ausbildungstypen in Erscheinung:

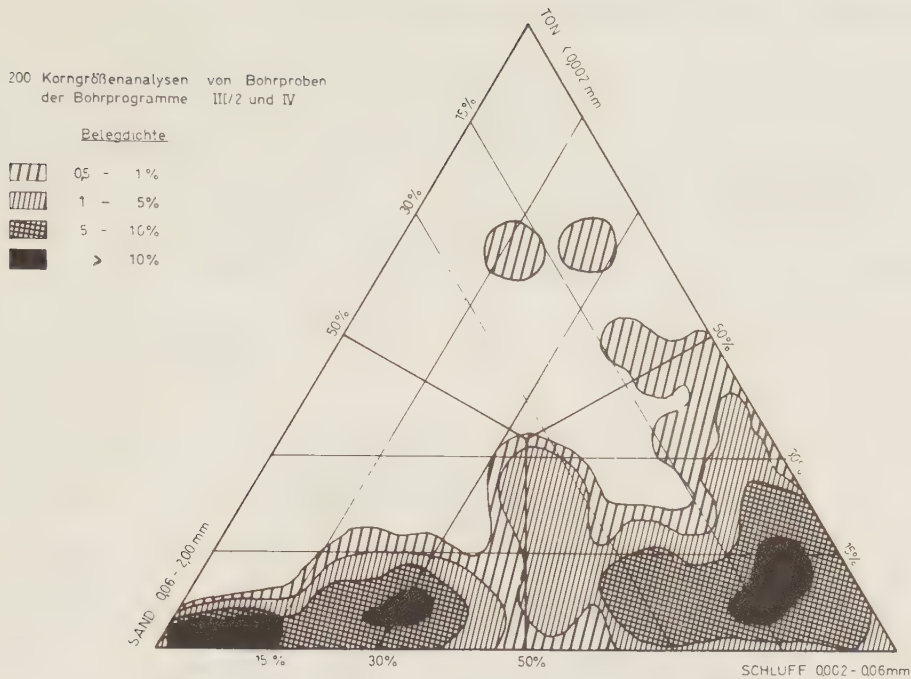


Abb. 8 Dreiecksdarstellung für die sandigen und schluffigen Bodenarten des Jungtertiärs

mS, fs', su' - su	<u>Mittelsande</u> (schwach schluffig - schluffig)
mS, fs , su' - $\overline{su}$	
mS, $\overline{fs}$, su' - $\overline{su}$	<u>Fein- Mittelsande</u> (schwach schluffig - stark schluffig)
fs , ms, su' - $\overline{su}$	
fs , $\overline{ms}$, su' - $\overline{su}$	
fs , ms', su' - su	<u>Feinsande</u> (schwach schluffig - stark schluffig)
fs , ms', $\overline{su}$	

Da sich in der Praxis der Bohrprobenansprache und Baugrubenkartierung feinsandige bis stark feinsandige Mittelsande von mittelsandigen bis stark mittelsandigen Feinsanden kaum unterscheiden lassen und da die geotechnischen Eigenschaften dieser Sande sehr ähnlich sind, werden sie zum Typ der Fein-Mittelsande zusammengefaßt. Die schluffigen Beimengungen werden wie üblich angegeben. Der Bereich der Fein-Mittelsande ist in Abbildung 9 eingezeichnet.

Insgesamt ergeben sich also drei Haupttypen der sandigen Flinzausbildung.
Ihre Kornkennzahlen sind in Tabelle 4 angeführt.

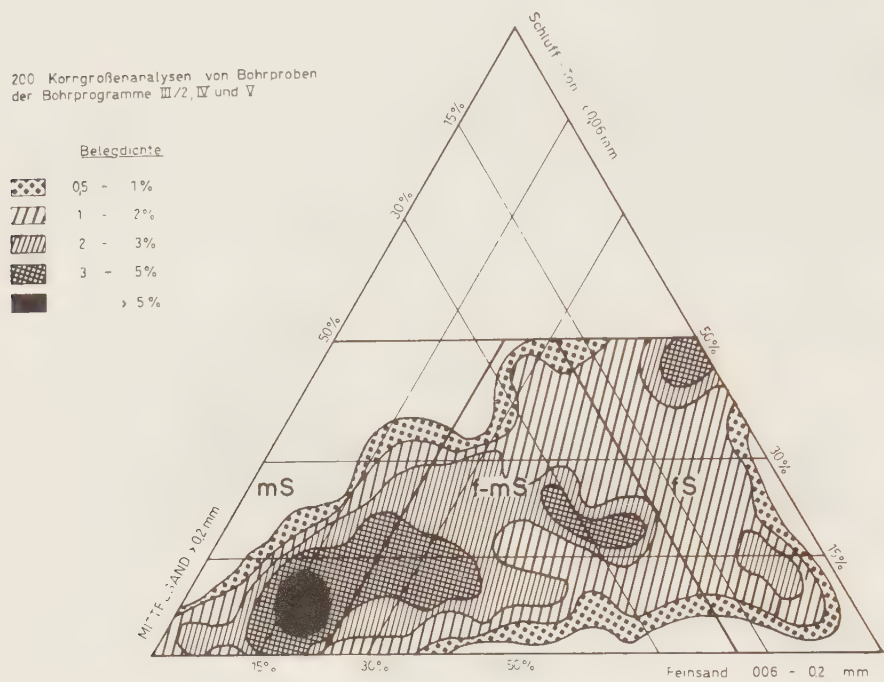


Abb. 9 Dreiecksdarstellung für jungtertiäre Sande

Tabelle 4 Kornkennzahlen jungtertiärer Sande

Bodenart	Su+T (< 0.06 mm) %	d ₅₀ mm	d ₁₀ mm	$U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$
mS, su' - su	2-20	0.25 -0.35	0.17 -0.23	1.5-2.5
fS - mS, su' - $\overline{su}$	12-35	0.25 -0.16	0.02 -0.08	3.5-9.0
fS, su - $\overline{su}$	15-49	0.065-0.125	0.008-0.02	7.0-16

Auf Grund ihrer Korngrößen lassen sich also in den tertiären und in den quartären Ablagerungen charakteristische Hauptbodenarten unterscheiden, die auch in der Baugrube und bei der Bohrprobenansprache ohne Schwierigkeiten erkannt werden können (vgl. Anhang).

3.3 Petrographie und Kornform

3.31 Schotter

Die Tertiärkiese bestehen zum überwiegenden Teil aus gut gerundeten Quarzgeröllen. Vereinzelt finden sich auch plattige Kalk-, daneben Hornstein-, Kristallin- und Sandsteingerölle, auch Mergelgerölle und umgelagerte Kalkkonkretionen, die aus aufgearbeiteten Sedimenten stammen, treten häufig auf.

3.32 Sande und Mergel

3.321 Leichtmineralien der Schluff- und Sandfraktion

Die Flinzsande sind schwach feldspatführende, glimmerhaltige bis glimmerreiche Quarzsande. Nach Untersuchungen an Streupräparaten und Sandsteinanschliffen (vgl. II, 3.1) liegen die Gehalte des Quarzes zwischen 65 und 75 %, des Glimmers zwischen 20 und 30 %, und des Feldspates zwischen 5 bis 10 %. Die Sande sind meist geschichtet. Im Anstehenden wechseln Millimeter bis mehrere Zentimeter mächtige helle und dunkle Lagen (vgl. II, 3.6): in den dunklen Schichten ist der Glimmer angereichert. Muskowit und Biotit lassen sich nachweisen. Soweit es sich durch Anfärbemethoden (MÜLLER 1964) ermitteln ließ, überwiegt bei den Feldspäten der Kalifeldspat den Plagioklas.

In der Kornfraktion über 0.5 mm sind in den Sanden die Quarz- und Feldspatkörner kantengerundet bis gerundet. In den Fraktionen darunter sind sie eckig oder splittrig. Die Glimmer sind immer schuppig oder blättchenförmig ausgebildet; sie reichern sich meist in der Körnungsklasse über 0.3 mm an. Die Erklärung ist durch die Art des Transportes gegeben: sie reichern sich hier, bedingt durch den schwebenden Transport an. Auch bei den Schluffen und Tonen besteht die Sand- und Schlufffraktion (> 0.002 mm) zum größten Teil aus detritischen Quarzsplittern und Glimmerschüppchen.

3.322 Leichtmineralien der Tonfraktion

Die Tonfraktion der Mergel wurde durch Differenzialthermo- (DTA) und Röntgenphasenanalyse untersucht. Die Versuche wurden freundlicherweise von Herrn Dipl.-Geol. R. HEROLD (Institut für Mineralogie der Technischen Hochschule München) durchgeführt und ausgewertet.

3.3221 Differenzialthermoanalysen

Durch Abschlämmen des wie üblich vorbehandelten Materials (vgl. II, 3.2) wurde die Korngrößenfraktion < 0.002 mm gewonnen. Neben einer Inertsubstanz (totgebrannter Kaolin) wurden ca. 0.8 g der Probe im Nickelblock kontinuierlich aufgeheizt. Die Temperaturdifferenzen zwischen der Inertsubstanz und der Probe werden in Kurven, die für die einzelnen Materialien typisch sind, registriert. Wie die in Abbildung 10 dargestellten DTA-Kurven zeigen, ist die mineralogische Zusammensetzung in der Tonfraktion der Flinzmergel unterschiedlich:

Die Probe NS 415 verlor stufenweise bei 115°C und 150°C das Hydratationswasser. Bei 580°C erfolgte die Abgabe des chemisch gebundenen Wassers. Eine schwache exotherme Reaktion tritt bei 950°C auf. Die DTA-Kurve ähnelt weitgehend den in der Literatur angeführten Illitkurven.

Die Probe NS 368 dagegen zeigt eine Kurve, wie sie für die Tonfraktion der niederbayerischen Molassesedimente typisch ist: der Verlust des Adsorptionswassers geht in zwei Stufen vor sich, nämlich bei 145°C (Hauptreaktion) und bei 235°C . Dieser "Doppelpeak" ist charakteristisch für Montmorin-Mineralen, deren austauschbare Zwischenschichtplätze mit hydratisierten Ca-Ionen belegt sind. Der flache Doppelpeak (geringe Wärmetönung) bei 563°C spricht für nur wenig chemisch gebundenes Wasser in der Substanz. Daraus läßt sich schließen, daß das Material im wesentlichen aus einem Dreischichtensilikat besteht, während die schwache, gerade noch erkennbare Verdoppelung des Peaks eine geringe Beimengung von Kaolinit (Zweischichtensilikat) anzeigt. Die Entwässerungsreaktion bei 560°C ist allerdings wenig typisch für den bis 700°C thermisch stabilen Montmorillonit, sie spricht für Beidellit und Nontronit. Die intensiv rote Farbe des bei über 1000°C gebrannten Materials zeigt einen relativ hohen Eisengehalt an. Die schwache endotherme Reaktion bei 896°C ist charakteristisch für nicht allzu hohe Gehalte an Montmorin-Mineralien.

Die Probe NS 314 zeigt ein Diagramm, aus dem sich nur ein geringer Gehalt an Montmorillonit erkennen läßt. Alle übrigen thermischen Reaktionen, vor allem bei 430°C und 840°C lassen sich nicht deuten. Wahrscheinlich handelt es sich um Wärmereaktionen detritischer Minerale, welche bei verschiedenen Temperaturen unter positiver Wärmetönung umkristallisieren. Dabei sind vermutlich Karbonate an den Reaktionen beteiligt.

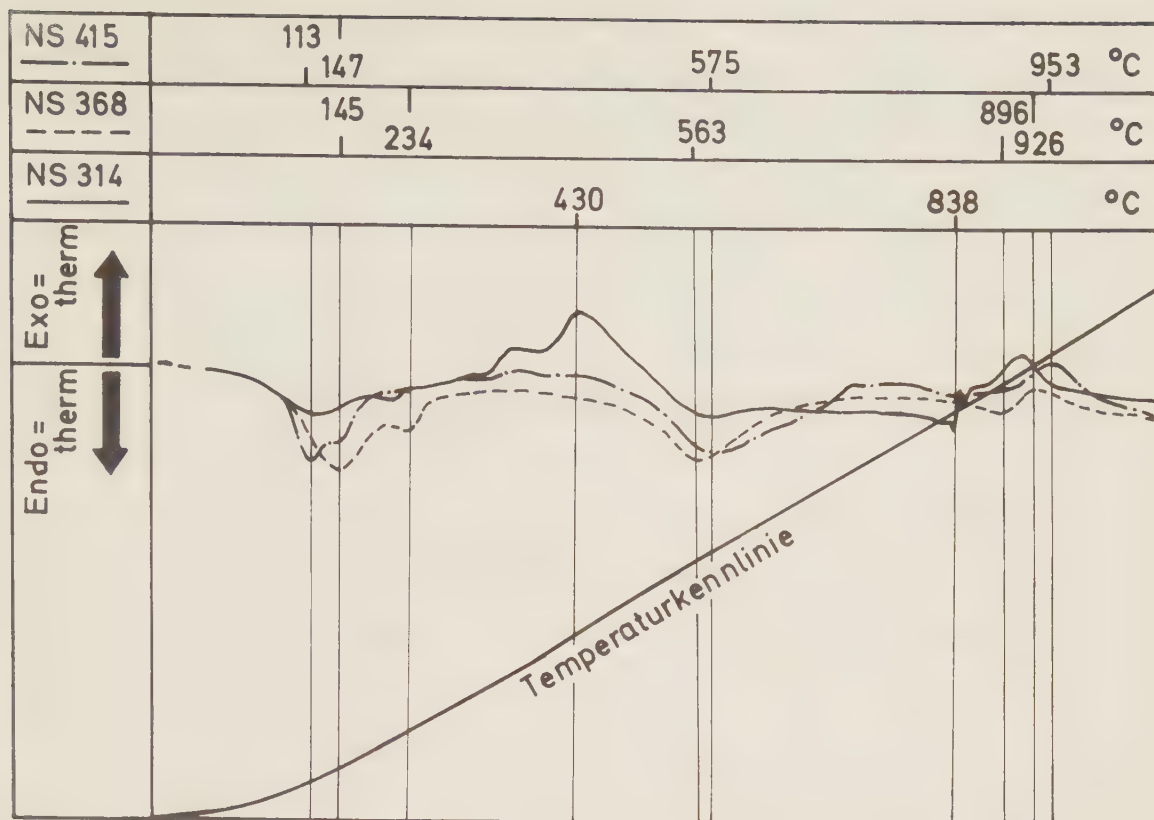


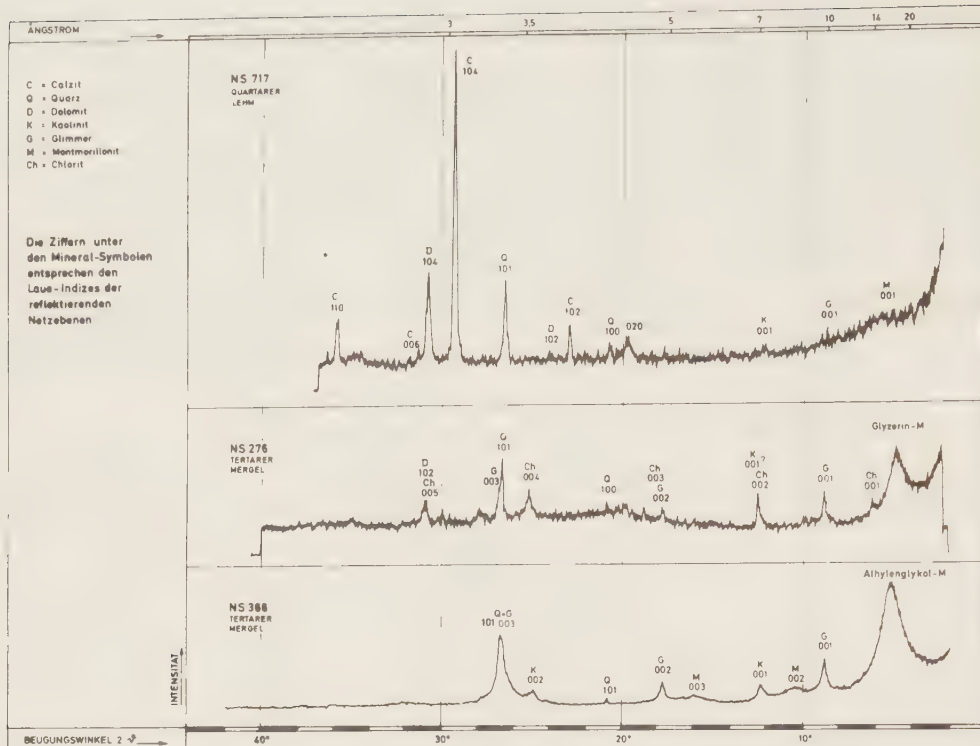
Abb. 10 DTA-Kurven jungtertiärer Schluffe

3.3222 Röntgenphasenanalysen

Bei der Röntgenphasenanalyse wurden mit dem Röntgendiffraktometer (Cu- k_{α} -Strahlungen) Textur- oder Pulverpräparate des wie üblich vorbehandelten Materials (vgl. II, 3.221) untersucht. Die Analyse beruht auf dem Effekt der Röntgenstrahlenbeugung am Kristallgitter, wobei die vom Gitterabstand der Minerale abhängigen Beugungswinkel registriert werden. Die Ergebnisse der Röntgenographischen Untersuchungen sind in Abbildung 11 dargestellt:

Die Probe NS 276 (ebenso NS 314 und NS 415) enthalten in der Tonfraktion reichlich Montmorillonit, detritischen Glimmer und Quarz, sowie untergeordnet auch Chlorit und Dolomit. Nach der Schärfe der Röntgenreflexe zu urteilen, ist der Glimmer gut kristallisiert und dürfte daher als detritischer Glimmer primär aus Glimmerschiefern oder anderen Kristallingesteinen stammen. Ähnliches gilt für den in glimmerreichen Proben auftretenden Chlorit. An der Asymmetrie der geradzahlgigen Röntgenreflexe ($d_{002} = 7.1$; $d_{004} = 3.54$) läßt sich erkennen, daß neben dem Chlorit auch untergeordnet Kaolinit ($d_{001} = 7.2$; $d_{002} = 3.58$) vorkommt.

Bei der Probe NS 368 enthält die Tonfraktion in der Hauptsache Montmorillonit, daneben Glimmer mit etwas Illit und untergeordnet auch Kaolinit und nur wenig Quarz.



Die Abtrennung der Schwermineralien erfolgte aus einer Einwaage von ca. 2 g der Sandfraktion 0.063 - 0.25 mm durch Acetylentetrabromid (Dichte ca. 2.96) im SINDOWSKI'schen Scheidetrichter (MÜLLER 1964). Bei der Herstellung der Streupräparate diente Caedax (Brechungsindex 1.6) oder Lakeside (Brechungsindex 1.54) als Einbettungsmittel, und, soweit Lakeside verwandt wurde, Kollo-lith (Brechungsindex 1.53) als Abdeckmittel. Pro Präparat wurden in der Regel ca. 300 durchsichtige Körner ausgezählt. Insgesamt wurden 13 Proben untersucht. Ein Teil der Präparate wurde freundlicherweise von Herrn Dipl. Geologen H. FRANK hergestellt und ausgezählt.

Die Ergebnisse sind in der Tafel 2 für die Bohrung NS 650 aufgezeichnet. In Kreisdarstellungen wurde das Verhältnis der durchsichtigen zu den opaken Schwermineralien abgebildet, ebenso das Verhältnis Granat zu den Nichtgranat-Schwermineralien ohne Berücksichtigung des Opakanteils. Die Schwermineralien ohne Granat und Opakkörner wurden in Prozent umgerechnet und in Histogrammen dargestellt (Tafel 2).

Die Proben aus den jeweils repräsentativen Schichtkomplexen (vgl. II, 4) wurden meist in der Mitte der Schichtmächtigkeit entnommen, um bei der allgemeinen Charakteristik des Schwermineralspektrums sekundäre Effekte (Verwitterung u. a.) möglichst auszuschalten. Die festgestellten Extremgehalte der einzelnen Schwermineralien sind als Kernprozent in der Tabelle 5 angegeben.

Die untersuchten Schwermineralgesellschaften werden bestimmt durch das auffallende Granatmaximum und Opakminimum, wie es für Sedimente aus alpinen Liefergebieten typisch ist. Auch die deutlichen Gehalte an grüner Hornblende und Staurolith weisen auf die Alpen als distributive Provinz hin. Die Epidotgehalte sind relativ gering. In Einzelfällen scheinen sich auch Verwitterungseffekte geringfügig auszuwirken: in der Nähe von innertertiären Erosionsdiskordanzen (vgl. II, 4) scheinen die verwitterungsstabilen Mineralien wie Rutil, Staurolith und Zirkon in ihren Gehalten anzusteigen. Die Granate zeigen dann meist geringe Ätzspuren, obwohl sich ihre Gehalte nicht wesentlich vermindern.

Tabelle 5 Extremgehalte der Schwermineralspektren jungtertiärer Sedimente

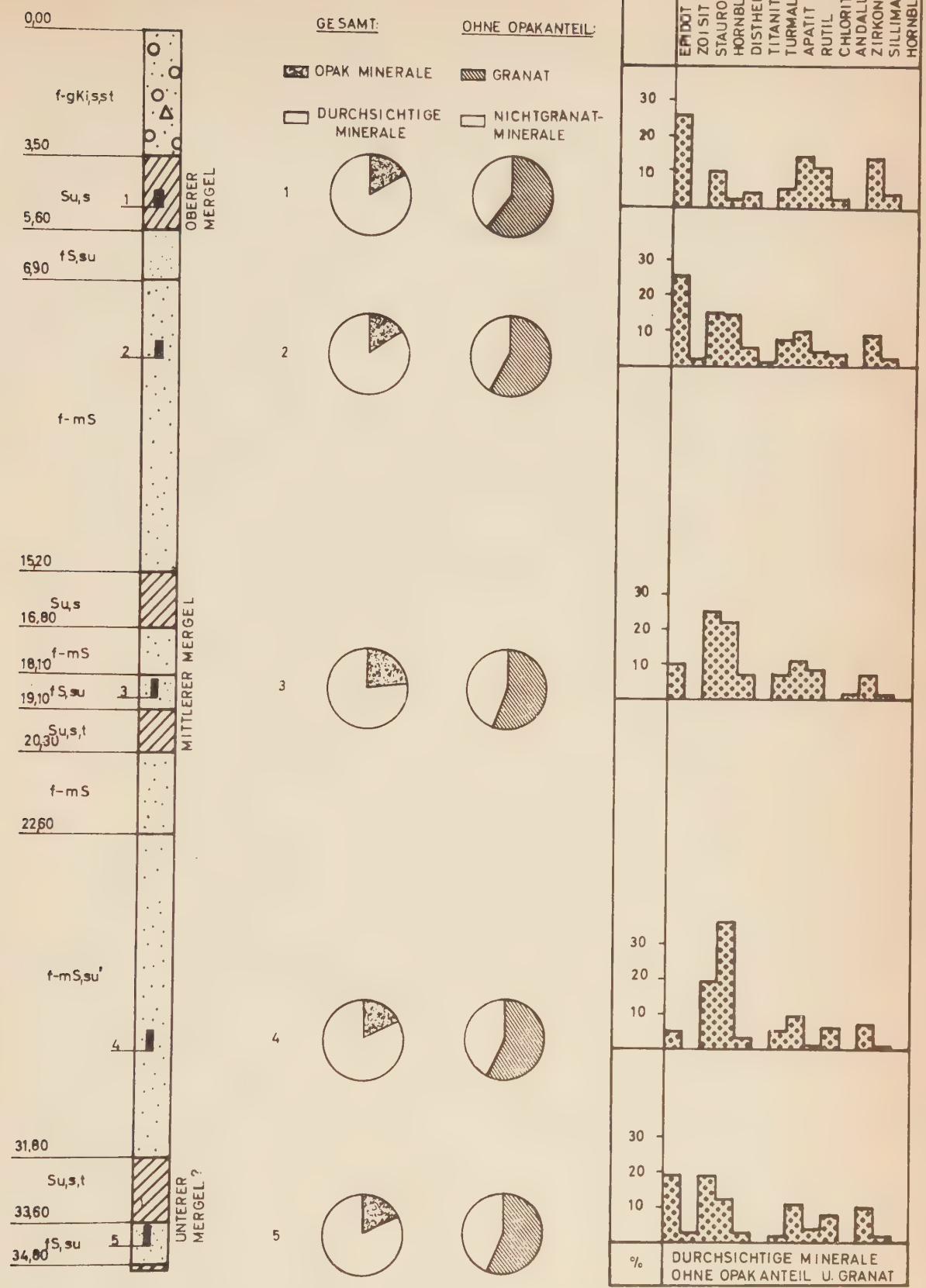
Schwermineralien	Extremgehalte in Kornprozent	
	ohne Opakanteil	ohne Opak- und Granatanteil
Granat	54.0 - 74.0 %	-
Epidot	1.9 - 10.5 %	4.5 - 26.2 %
Zoisit	0.0 - 3.0 %	0.0 - 6.1 %
Staurolith	3.3 - 10.8 %	17.4 - 24.8 %
Hornblende gr.	0.9 - 14.2 %	2.3 - 36.7 %
Disthen	0.6 - 3.8 %	2.4 - 15.0 %
Titanit	0.0 - 1.0 %	0.0 - 3.2 %
Turmalin	1.0 - 3.8 %	2.3 - 8.0 %
Apatit	0.3 - 8.6 %	1.3 - 19.2 %
Rutil	0.3 - 5.3 %	0.7 - 18.0 %
Chloritoid	0.0 - 6.2 %	0.0 - 13.8 %
Andalusit	0.0 - 1.7 %	0.0 - 3.8 %
Zirkon	0.6 - 5.5 %	2.5 - 16.0 %
Sillimanit	0.0 - 2.3 %	0.0 - 8.0 %
Hornblende br.	0.0	0.0
Opakanteil (in Kornprozent vom Gesamtspektrum)	5.8 - 25.6 %	

Die Schwermineralspektren des Flinzmergels und Flinzsandcs unterscheiden sich in den vorkommenden Schwermineralien und in den Gehalten der einzelnen Schwermineralien praktisch nicht. Der Unterschied besteht lediglich in der Korngröße.

3.4 Karbonatgehalt

Der Karbonatgehalt jungtertiärer Sedimente wurde mit der SCHEIBLER-Apparatur bei einer Einwaage von meist 0.5 und 1.0 g unter Verwendung von 2proz. Salzsäure ermittelt (SCHULZE-MUHS 1950). Er ist häufig und besonders bei den schluffigen Bodenarten sekundär verändert: es finden sich größere oder

NS 650



Tafel 2 Schwermineralvergesellschaftung jungtertiärer Sedimente am Beispiel der Bohrung NS 650

kleinere Kalkkonkretionen, während die benachbarten Partien nur geringe Karbonatgehalte aufweisen. Auch bankartige, durch diagenetische Vorgänge, verfestigte Zonen treten in den Sedimenten auf. Die Ergebnisse der Karbonatgehaltsbestimmungen zeigt die Tabelle 6.

Benennt man die Sedimente nach ihren Karbonatgehalten, indem man das Schema der Ton- ⁺⁾ Kalk-Reihe nach PETTIJOHN (TERZAGHI u. PECK 1961) anwendet, so ergibt sich, daß im Flinzmergel praktisch alle Glieder von Ton ⁺⁾ bis zum mergeligen Kalk vorkommen können. Die Häufigkeit des Auftretens der einzelnen Sedimentstypen ist örtlich verschieden, es überwiegen jedoch im Flinzmergel die Kalkgehalte zwischen 15 und 40 %.

Tabelle 6 Karbonatgehalte jungtertiärer Sedimente (50 Analysen)

Bezeichnungen nach DIN 4022		Karbonatgehalte
Boden- arten	Fein-Mittelsande	0.6 - 1.5 %
	Feinsande, stark schluffig	0.3 - 19.0 %
	Schluffe	1.6 - 72.0 %
	Tone	0.2 - 8.0 %
Fels	Sandsteine	65.0 - 75.0 %
	Mergelsteine	75.0 - 83.0 %

Tabelle 7 Ton ⁺⁾ - Kalk - Reihe nach PETTIJOHN (1949)

DIN 4022	Bez. nach PETTIJOHN	Karbonatgehalte
Boden- arten	Ton ⁺⁾	0 - 5 %
	mergeliger Ton ⁺⁾	5 - 15 %
	Mergelton ⁺⁾	15 - 25 %
	toniger Mergel	25 - 35 %
	Mergel	35 - 65 %
	kalkiger Mergel	65 - 75 %
Fels	Mergelkalk	75 - 85 %
	mergeliger Kalk	85 - 95 %
	Kalkstein	95 -100 %

⁺⁾ Der Begriff Ton ist hier im Sinne von "Nichtkarbonat" gebraucht, er entspricht nicht der Korngrößenbezeichnung der DIN 4022.

Ein Teil des Karbonatgehaltes der schluffig-tonigen Sedimente des Jungtertiärs ist durch Dolomit bedingt. Nach DREIMANIS (MÜLLER 1964) entspricht die nach ca. 20 Sekunden HCl-Einwirkung auf das Untersuchungsmaterial an der SCHEIBLER-Apparatur abgelesene CO₂-Menge näherungsweise dem Kalkgehalt. Aus der sich danach bis zum Endpunkt der 25minütigen Einwirkungsdauer der Salzsäure auf die Probe ergebenden CO₂-Menge kann dann der Dolomitgehalt berechnet werden. Selbstverständlich handelt es sich hierbei nur um grobe Näherungswerte. Einzelne so ermittelte Gehalte sind in der Tabelle 8 aufgeführt.

Tabelle 8 Karbonatgehalte von drei Proben des Flinzmergels, ermittelt aus den in der SCHEIBLER-Apparatur gemessenen CO₂-Mengen nach 20 s und 25 min HCl-Einwirkungsdauer auf die Proben

Karbonat-Gehalte aus den Ablesungen nach 20 s (bezogen auf Calcit)	Karbonat-Gehalte aus den Differenzablesungen nach 25 min (bezogen auf Dolomit)	Gesamtkarbonatgehalte	Bezeichnung der Bodenarten nach PETTIJOHN (1949)
58.2	10.4	68.6	kalkiger Mergel
28.0	1.0	29.0	toniger Mergel
24.2	12.6	36.8	Mergel

3.5 Natürlicher Wassergehalt und Bildsamkeitsgrenzen

Der natürliche Wassergehalt gehört zu den kennzeichnenden Eigenschaften der tonig-schluffigen Sedimente. Auf diesen Eigenschaften beruht das plastische Verhalten, das wiederum die Grundlage für die Einteilung und Benennung solcher Bodenarten bei bautechnischen Klassifizierungen bildet. Denn bei den bindigen Böden hängen die mechanischen Eigenschaften nicht so sehr von der Korngröße, sondern in erster Linie von ihrem Wasser- und Kolloidgehalt, von ihrer Plastizität und vom tonmineralogischen Charakter der kleinsten Körner ab (SZECHY 1963).

Der natürliche Wassergehalt ist das Verhältnis des Porenwassergewichtes zum Trockengewicht der Festmasse. Zu seiner Ermittlung wurde die Probe zuerst im bergfeuchten Zustand gewogen, bei 105⁰C getrocknet und dann das Trockengewicht bestimmt. Der natürliche Wassergehalt errechnet sich aus der Formel:

$$W_n = \frac{G - G_t}{G_t} \cdot 100 (\%) \quad (\text{SCHULZE-MUHS 1950})$$

wobei G das Gewicht der bergfeuchten Probe und G_t das Gewicht nach der Trocknung bei 105°C ist.

Das Ergebnis der Bestimmungen der natürlichen Wassergehalte ist in Tabelle 9 aufgeführt. Es ist allerdings zu bedenken, daß die Ergebnisse verfälscht sein können, weil die Bohrproben durch unsachgemäße Entnahme oder Verpackung, oder durch Wasseraufnahme aus der Spülung oft nicht mehr im ursprünglichen, bergfeuchten Zustand sind.

Fein-Mittelsande weisen, wie Mittelsande, einen deutlich geringeren Wassergehalt auf als schluffige, oder stark schluffige Feinsande. Die Feinsande verhalten sich z. T., wie in vielen ihrer bodenmechanischen und geotechnischen Eigenschaften, wegen ihres meist hohen Schluffanteils (25-40 %) ähnlich den Schluffen. Nach der bautechnischen Bodenklassifizierung gehören sie zu den gemischtkörnigen Böden (Su).

Tabelle 9 Natürliche Wassergehalte sandiger und schluffigtoniger jungtertiärer Sedimente

Bodenarten	Natürliche Wassergehalte in	
	Extremwerte	Mittelwerte
mS, su'	14.4 - 21.5	18.8
fS - mS, su' - su	11.6 - 22.5	19.43
fS, su - $\bar{s}u$	22.2 - 26.3	24.2
Su, s - $\bar{s}$, t'	12.5 - 21.8	18.0
Su, s', t	11.6 - 32.0	21.3
Su, s', t'	18.5 - 21.8	20.1

Die Bildsamkeitsgrenzen der Flinzmergel (Ausrollgrenze W_a , Fließgrenze W_f) wurden durch das Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Hochschule, München, an ungestörten Bodenproben (Fraktion < 0.04 mm) bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 und in einer Plastizitätskarte nach CASAGRANDE (TERZAGHI u. PECK 1961) dargestellt (Abb. 12). Bildsamkeitsgrenzen der nichtbindigen Sande wurden nicht ermittelt. Die als Punkte in das

CASAGRANDE-Diagramm eingetragenen Analysenwerte wurden statistisch mit einem Einheitskreis ausgezählt (vgl. I, 3.21).

Wie Tabelle 10 zeigt, scheint die Fließgrenze W_f und die Plastizitätszahl W_{fa} von den Tongehalten der jeweiligen Proben abzuhängen.

Bei den schwach tonigen Schluffen liegt die Fließgrenze W_f in der Regel zwischen 30 und 40 %, die Plastizitätszahl W_{fa} zwischen 9 und 25 %. Bei höheren Tongehalten (15 - 30 %) treten Fließgrenzen zwischen 44 und 66 % und Plastizitätszahlen um 30 % auf.

Die relativ großen Verschiedenheiten der Bildsamkeitsgrenzen sind wahrscheinlich zum Teil auch durch unterschiedliche tonmineralogische Zusammensetzungen der Flinzmergel bedingt (vgl. II, 3.322).

Tabelle 10 Bildsamkeitsgrenzen der Flinzmergel

Bodenarten	Tongehalte (<0.002 mm) %	Fließgrenzen W_f %	Plastizitätszahlen W_{fa} %
Su, $\bar{s}$, t' (1 Analyse)	12.0	29.9	12.5
Su, s, t'	3 - 5.0	34.2 - 34.5	9.1 - 11
	10.0 - 14.0	40.1 - 61.6	24.1 - 24.7
Su, s', t'	5.0 - 13.0	39.0 - 41.5	9.1 - 24.1
Su, s', t	15 - 28.0	44.3 - 65.8	15.0 - 35.7

Nach einer Plastizitätskarte (CASAGRANDE in TERZAGHI u. PECK 1961) in der Abbildung 12 handelt es sich überwiegend um anorganische Tone [†]) mittlerer bis hoher Plastizität und um Schluffe [†]) mittlerer bis hoher Verdichtbarkeit. Das Maximum liegt bei den Tonen mittlerer Plastizität und den Schluffen mittlerer Verdichtbarkeit. Die einzelnen Werte für die Bildsamkeiten schwanken stark, so daß das Belegfeld sich schräg durch das ganze Diagramm erstreckt und damit alle, durch die Bildsamkeitsgrenzen definierten Bodenarten

[†]) Die Begriffe sind hier durch bestimmte Bildsamkeitsgrenzen definiert; es sind nicht die Bodenarten nach den Korngrößenbegriffen der DIN 4022.

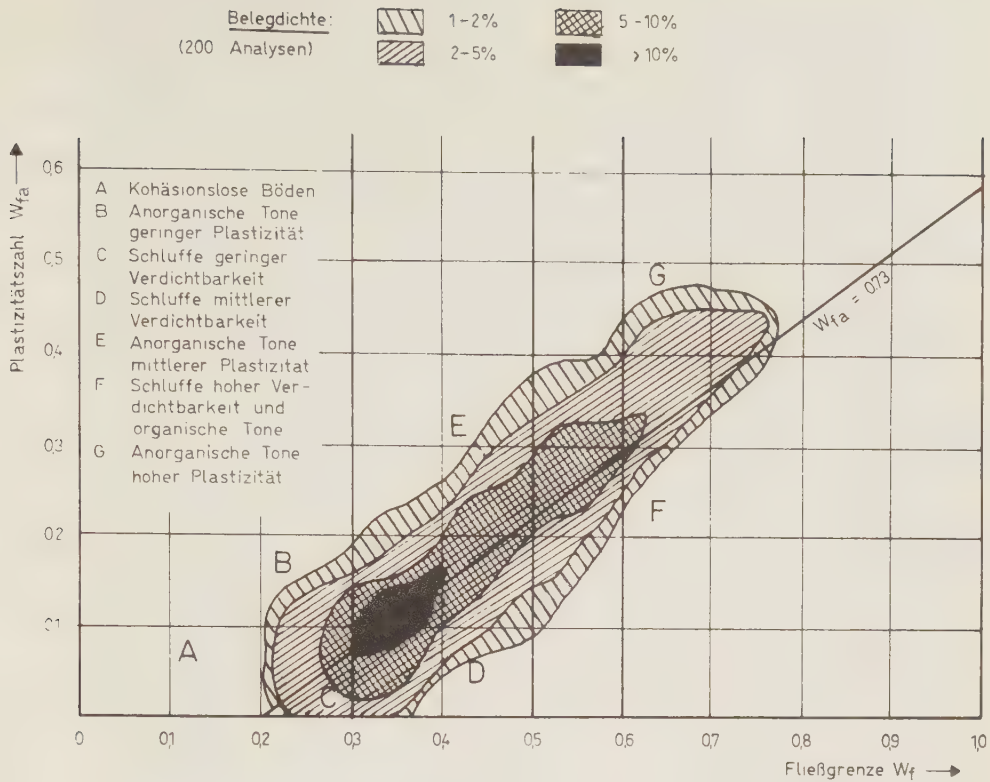


Abb. 12 Plastizitätskarte der Flinzmergel

mit Ausnahme der kohäsionslosen Böden (A) repräsentiert sind. Das Spektrum reicht von den Tonen ^{+) geringer Plastizität (B) bis zu den Tonen ^{+) hoher Plastizität (G).}}

Die Bodenarten mit geringen Plastizitäten sind stark wasserempfindlich, sie gehen bei einer geringen Erhöhung des Wassergehalts vom "festen" in den "breiigen" Zustand über (SZECHY 1963, TERZAGHI u. PECK 1961). Diese Bodenarten sind auch meist frostepfindlich (NEUMANN 1964).

Die Zustandszahlen k_w (TERZAGHI u. PECK 1961) werden nach der Formel berechnet:

$$k_w = \frac{W_f - W_n (0.04)}{W_f - W_a} \quad (\text{TERZAGHI u. PECK 1961})$$

Sie liegen in der Regel über eins; die Bodenarten charakterisieren damit nach der DIN 4020 einen "halbfesten bis festen Zustand". Nach SZECHY (1962) wer-

^{+) Die Begriffe sind hier durch bestimmte Bildsamkeitsgrenzen definiert; es sind nicht die Bodenarten nach den Korngrößenbegriffen der DIN 4022.}

den bindige Böden mit Zustandszahlen zwischen 0.75 und 1.00 als "noch ausrollbar", bindige Böden mit Zustandszahlen zwischen 1.00 und 1.50 als "hart" bezeichnet. Nur einzelne der untersuchten Schichten, die sich entweder durch einen hohen Sandgehalt (Su, s) oder durch zahlreiche kleine Kalkkonkretionen auszeichnen, weisen geringere Zustandszahlen (0.60 - 0.95) auf ("steifer Zustand").

3.6 Sedimentgefüge

Das Gefüge ist "die Summe aller Raumdaten im Inneren eines betrachteten Bereichs" (SANDER 1948). "In den einzelnen Gefügeelementen sind die im Ablagerungsmilieu herrschenden Bewegungsabläufe fixiert" (BUCHNER 1967).

Die beim U-Bahn-Bau erschlossenen jungtertiären Sedimente, besonders die Sande, zeichnen sich durch ein deutliches Schichtungsbild aus. Die Gefügeabbildung beruht auf einer kontinuierlichen Folge von hellen und dunklen Lagen, wobei in den dunklen Lagen der Glimmer angereichert ist (vgl. II, 3.32). Bei den Sanden wird die Schichtung dann häufig noch durch rostbraune Eisenausfällungen in den wegsameren Lagen besonders hervorgehoben.

Es war nicht Aufgabe dieser Arbeit, alle auftretenden Gefügetypen zu beschreiben und zu deuten. Die Gefüge der Sedimente wurden nur dann charakterisiert, wenn dies zur eindeutigen Schichtcharakterisierung notwendig war.

3.61 Schräg- und Kreuzschichtung

Die Schrägschichtung wird im allgemeinen als ein Relikt von Strömungsgroßrippeln gedeutet (BUCHNER 1967). Sie entsteht durch eine systematische Anordnung von geringmächtigen Schichtblättern, deren schrägliegende Spuren in den Aufschlußwänden sichtbar werden. Es handelt sich in der Regel um sogenannte Leebblätter, die sich auf den stromabwärts geneigten Leehängen der einzelnen Schüttungskörper absetzen (Tafel 3).

Bei der Schrägschichtung haben die Leebblattspuren sämtlicher Schichtungseinheiten im Anschnitt gleichen Neigungssinn. Sind Einheiten dazwischen geschaltet, deren Leebblattspuren in entgegengesetzter Richtung einfallen, so spricht man von Kreuzschichtung. Es handelt sich also dann um eine Schrägschichtung mit wechselnder Einfallrichtung (BUCHNER 1967).



Fig. a



Fig. b

Tafel 3 Schrägschichtung in jungtertiären Fein-Mittelsanden
 Fig. a und b (Baulos 2, Bahnhof Alte Heide, früher Nordfriedhof)

Je nach der Länge der schräggeschichteten Einheiten unterscheidet man nach REINEK (1963) zwischen mittel- (0.3-6 m) bis großdimensionaler (> 6 m) und kleindimensionaler Schrägschichtung (≤ 0.30 m).

In den Fein- und Mittelsanden treten alle Arten von geradliniger oder bogiger Schräg- und Kreuzschichtung auf. Besonders im Norden (Baulos 1, 2 und 4) war in den unteren Partien der dort auftretenden Sande eine mitteldimensionale Schrägschichtung vorherrschend. In der Stadtmitte (Baulos 9) überwog in den dort erschlossenen Sanden eine kleindimensionale Kreuzschichtung (vgl. III, 3).

Im Baugrubenaufschluß sind die einzelnen Serien zwischen 50 mm und 3 m lang; ihre Mächtigkeiten schwanken zwischen 2 mm und 40 mm. Die einzelnen geschichteten Einheiten werden diskordant abgeschnitten, sie sind im Aufschlußbild meist linsen- oder keilförmig ausgebildet. Schaufelförmige Sigmoidalblätter sind selten. In den großdimensionalen Schrägschichtungsserien sind - zum Teil schnurartig angeordnet - Quarzgerölle eingelagert.

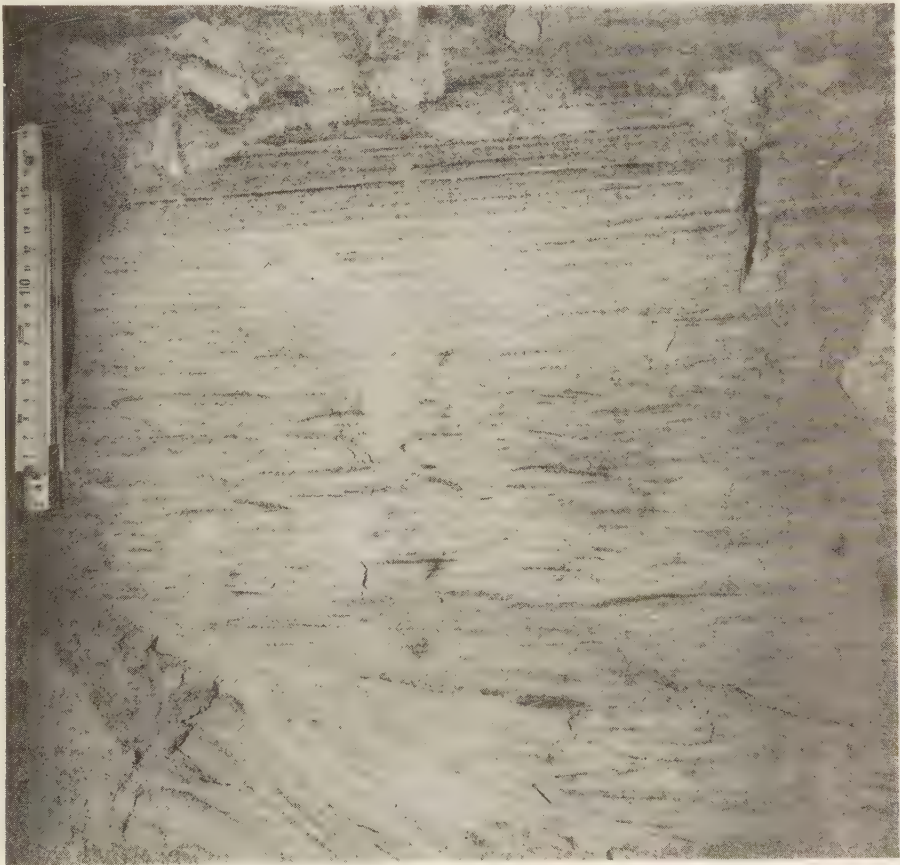


Abb. 13 Übergang einer feinblättrigen, bogigen Kreuzschichtung in eine ebene Feinschichtung in schluffigen Feinsanden des Jungtertiärs (Baulos 1)

Gegen die Mergel im Hangenden der Sande tritt eine feinblättrige, kleindimensionale, bogige Kreuzschichtung in den mehr oder weniger schluffigen Feinsanden auf, die mit zunehmendem Schluffgehalt der Sande in eine ebene Feinschichtung übergeht (Abb. 13). Diese ebene Feinschichtung ist auch für den "stark sandigen Schluff" typisch, der wie schon erwähnt (vgl. II, 3.22), in der geologischen Kornklassifizierung nach v. ENGELHARDT (FÜCHTBAUER 1959) dem "Staubsand" entspricht.

3.62 Schichtinterne Fältelungserscheinungen

Bereiche mit schichtinternen Verfaltungen sind in den Fein-Mittelsanden keine Seltenheit; sie sind meist auf geringmächtige Zonen (0.2 bis 1.0 m) beschränkt und auch ihre laterale Ausdehnung ist mit maximal 2 m relativ gering. Meist sind die Verfaltungen durch Diskordanzen gekappt (Abb. 14). Auch postsedimentäre Verwerfungen sind in Einzelfällen erkennbar.

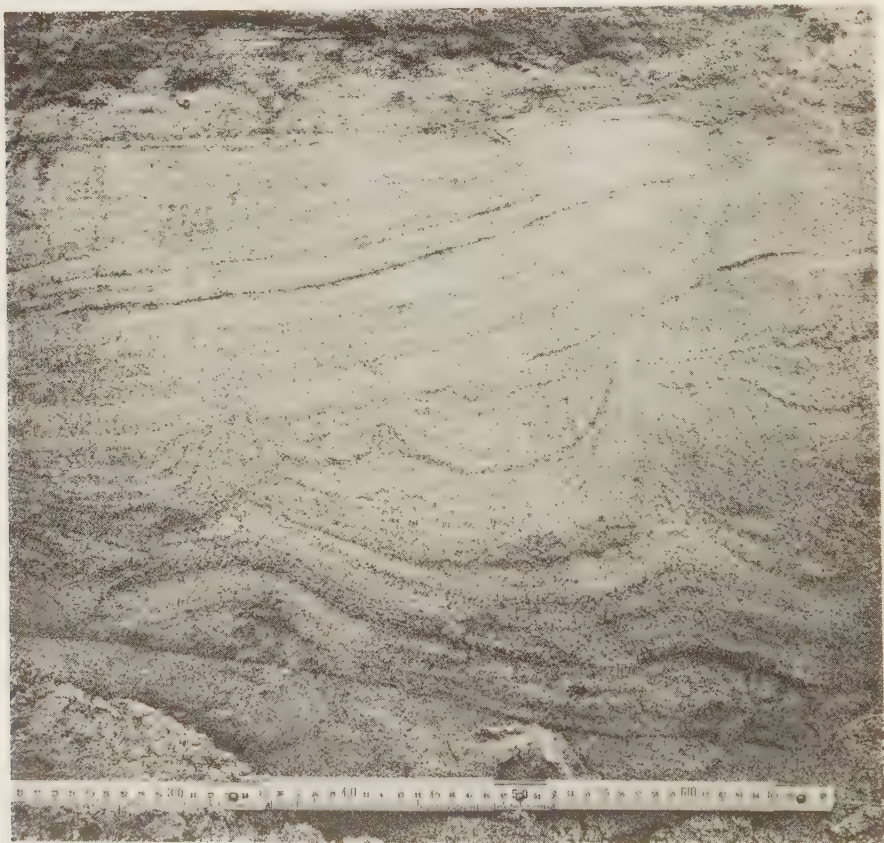


Abb. 14 Schichtinterne Fältelungserscheinung, diskordant gekappt (Baulos 2)

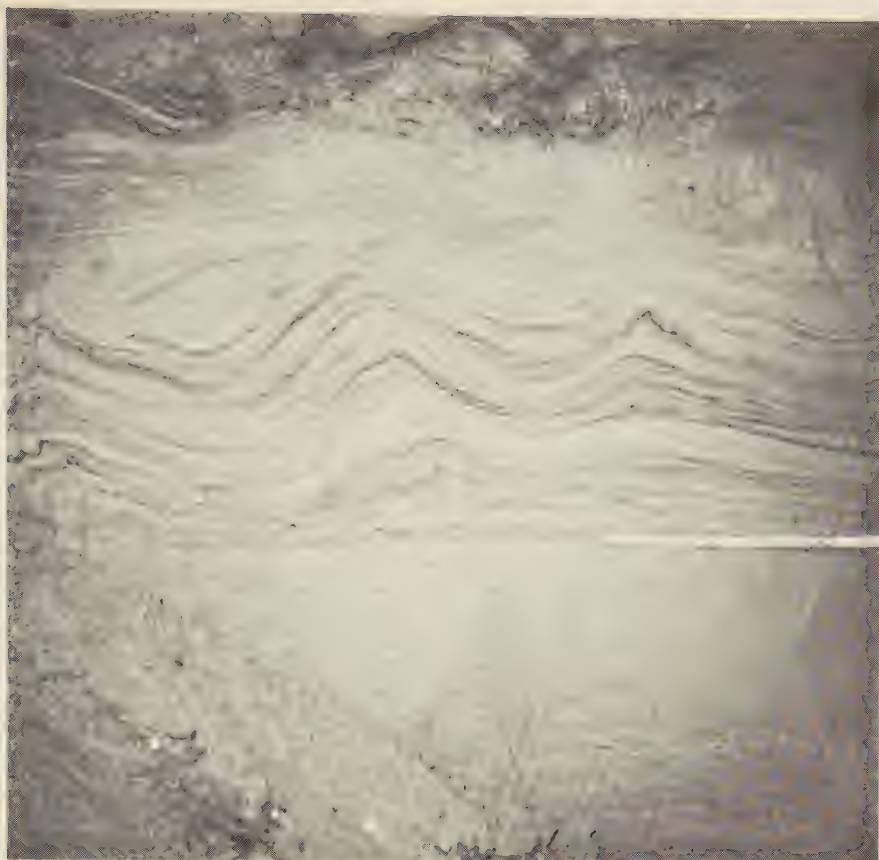


Fig. a

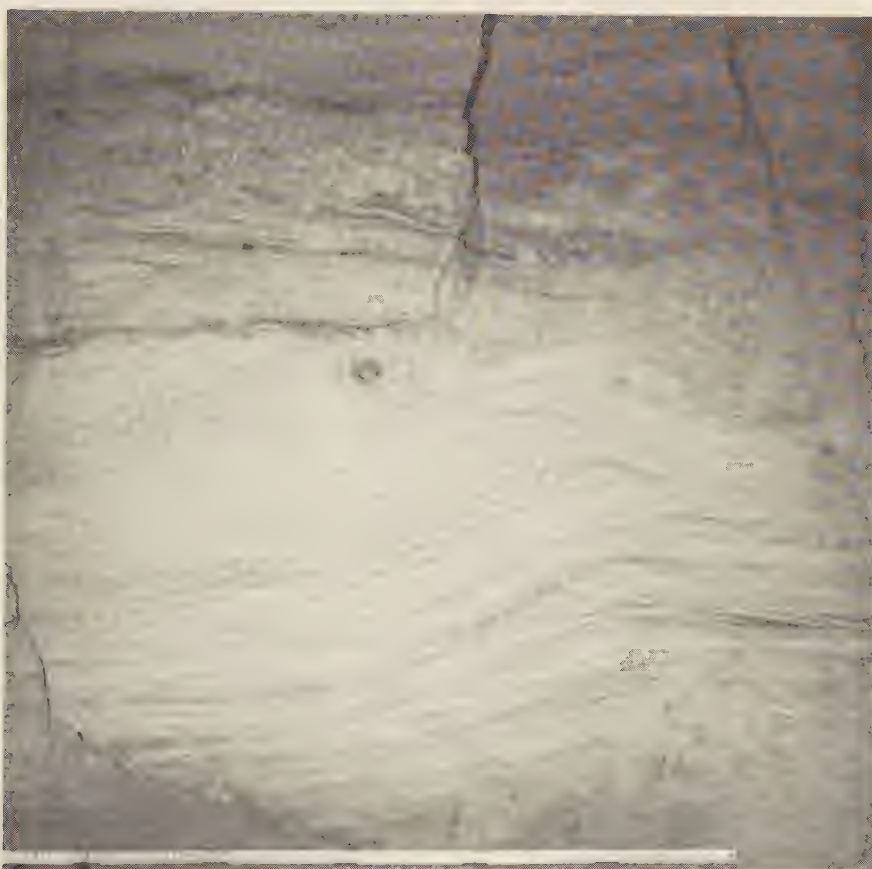


Fig. b

Ungestörte Schichten finden sich im Hangenden und auch im Liegenden der Verfaltungen. Die Fältelung setzt über horizontalgeschichteten Partien im allgemeinen ziemlich schwach ein und wird dann gegen das Hangende in zunehmendem Maße stärker, bis sie durch ungestörte, schräggeschichtete Schichten oder Aufarbeitungslagen gekappt werden (Tafel 4).

Diese Fältelungserscheinungen sind mit Sicherheit nicht tektonischer Natur und gehören wohl zur Gruppe des "convolute bedding". Gleitbahnen oder Abscherungen sind nicht beobachtbar. Nach RABIEN (1956) sind solche Fältelungserscheinungen "auf Ausgleichsbewegungen eines instabilen Sediment-Wasser-Breies während und unmittelbar nach der Sedimentation" zurückzuführen (BUCHNER 1967).

Ausgesprochen subaquatische Rutschungen mit Abscherungsbahnen und Brucherscheinungen treten nur an wenigen Stellen in den sandigen Mergeln auf.

3.63 Wühlgefüge

Primäre Schichtgefüge können durch Organismen, die im Sediment oder auf seiner Oberfläche lebten, erheblich gestört sein. Nach RICHTER (1936) spricht man in solchen Fällen von Wühlgefügen.

Um solche Gefüge sichtbar zu machen, wurden ungestörte Bodenproben in der Baugrube entnommen, getrocknet, unter Vakuum mit Araldit gehärtet und angeschliffen (BUCHNER 1967). Da die Texturen bei stark schluffigen Sanden trotzdem nicht sehr deutlich in Erscheinung traten, wurden auch Dickschliffe hergestellt. Diese ca. 4 mm dicken Sedimentplatten wurden beidseitig angeschliffen und nach der Methode HAMLIN (MÜLLER 1964) mit Röntgenstrahlen untersucht ⁺⁾ . Bei den Röntgenaufnahmen solcher Dickschliffe werden die Röntgenstrahlen infolge der Dichte-Inhomogenitäten, die durch den schichtigen Aufbau der Sedimente bedingt sind, verschieden adsorbiert. Nur in den schluffigen bis stark schluffigen Feinsanden traten solche Wühltexturen auf (Tafel 5). Zum Teil ist die ursprüngliche Schichtung nur noch als Relikt erhalten. Der wiederholte Wechsel zwischen stark verwühlten, zum Teil entschichteten Abschnitten und

⁺⁾ Die Röntgenaufnahmen wurden freundlicherweise von Herrn Dr. L. HESS, München, durchgeführt.

solchen mit schwächerer Schichtverwühlung ist insbesondere im Bereich der Übergänge Sand zu Mergel häufig zu beobachten. Er deutet nach BUCHNER (1967) auf eine Änderung der Sedimentationsgeschwindigkeit und der Strömungsverhältnisse hin.

4. Lagerungsverhältnisse

Die beim U-Bahn-Bau aufgeschlossenen, jungtertiären Schichten lassen sich durch drei Mergelpakete gliedern. Um die Lagerungsverhältnisse an der Abbildung 15 zu erläutern, werden diese größeren Mergeleinschaltungen im Flinzsand als "Unterer, Mittlerer und Oberer Mergel" bezeichnet. Diese Abfolge gilt nur für das bisher erschlossene U-Bahn-Profil und entspricht nicht unbedingt einer horizontbeständigen Einteilung (vgl. II, 1.1). Diese Wechsellagerung von Flinzsanden und Flinzmergeln setzt sich mit Sicherheit im Liegenden und wahrscheinlich auch im Hangenden der bisher erschlossenen Schichten fort (vgl. II, 1.1). HABER, der die im Zusammenhang mit der S-Bahnprojektierung der Reichsbahn 1937/38 niedergebrachten Bohrungen auswertete, konnte auch mehrere "Flinzsand- und Flinzmergelstockwerke" unterscheiden.

Der "Untere Mergel" war im Norden im Baulos 2 und 4 aufgeschlossen: seine Basis wurde durch Bohrungen nicht erreicht. Ob der am Marienplatz erbohrte, tiefste Mergel, wie in Abbildung 15 angenommen, ebenfalls zu diesem Horizont gehört, ist unsicher. Über dem "Unteren Mergel" liegt mit scharfer Erosionsgrenze ein, bis zu 13 m mächtiger, Flinzsand. An seiner Unterkante treten Aufarbeitungslagen mit Quarzkiesen, Mergel- und Mergelsteingerölle, Kalkkonkretionen und Molluskenschill auf (Abb. 15, 16). Gegen das Hangende gehen diese Mittelsande über Fein-Mittelsande, schluffige Feinsande ohne scharfe Grenze in den "Mittleren Mergel" über. Wie Abbildung 15 zeigt, ist der "Mittlere Mergel" zwischen Münchner Freiheit und Sendlinger-Tor-Platz und im Bereich des Nordfriedhofs in Mächtigkeiten bis maximal 15 m verbreitet.

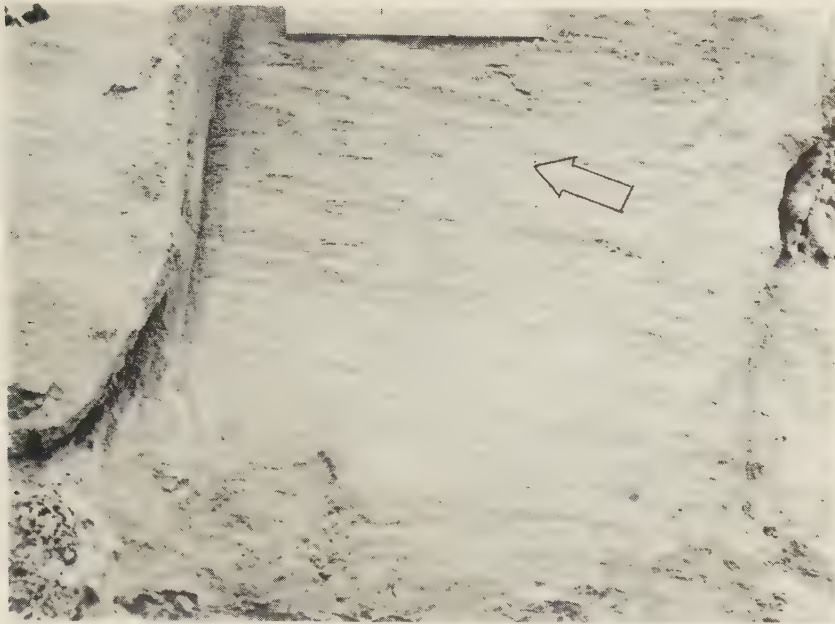


Fig. a

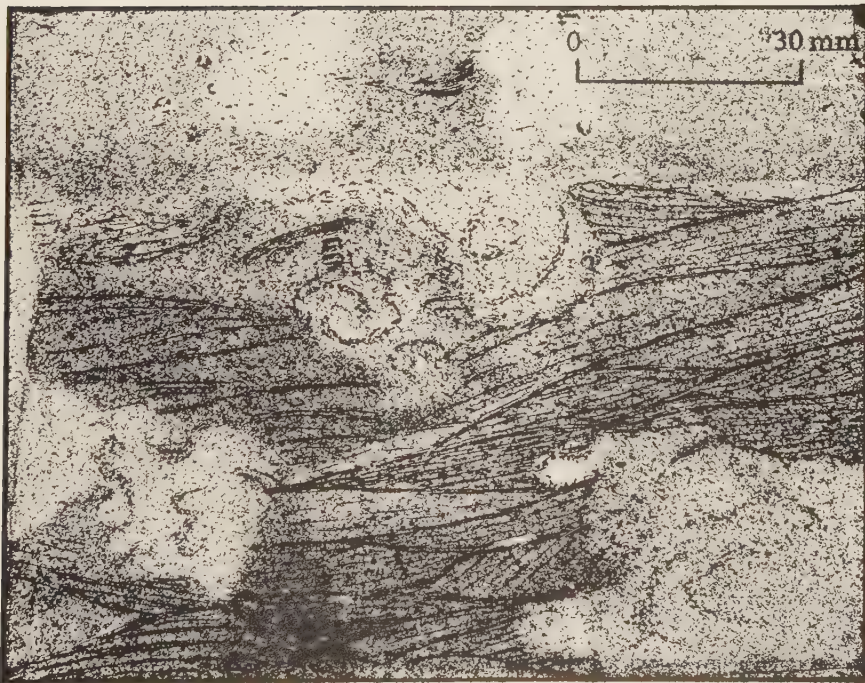


Fig. b

Tafel 5 Wühlgefüge in schluffigen bis stark schluffigen Feinsanden
Fig. a und b des Jungtertiärs (Baulos 2)

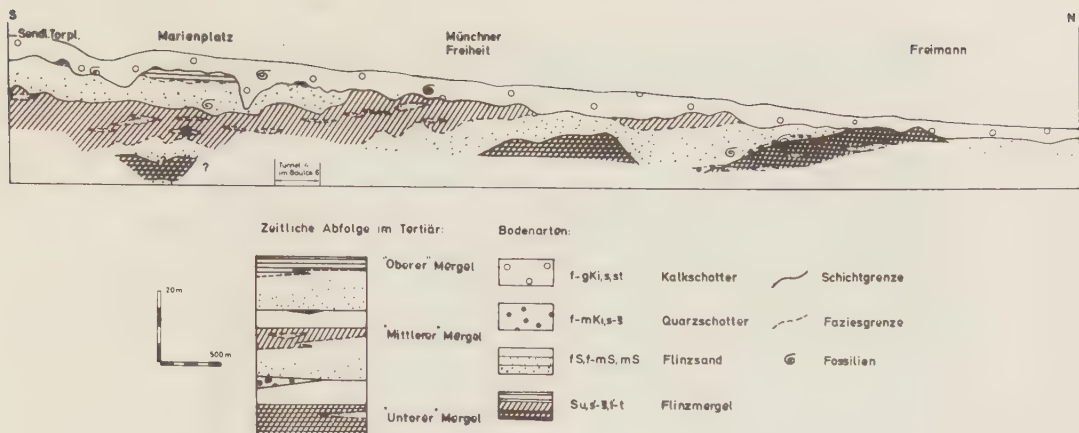


Abb. 15 Lagerungsverhältnisse längs der Nord-Süd-Trasse zwischen Freimann und Sendlinger-Tor-Platz

Über diesem Mergel folgt wieder mit scharfer Erosionsgrenze eine bis zu 11 m mächtige Flinsandschicht, die ebenfalls wieder nach Art eines "graded bedding" in den oberen Mergel übergeht. Nur an wenigen Stellen (Baulos 6, Tunnel 4 und Baulos 9, Tunnel 3) wurde im Hangenden des "Mittleren Mergels" bis zu 50 mm mächtige Aufarbeitungslagen mit Quarzkies gefunden. Sonst waren diese Aufarbeitungszonen meist weniger als 10 mm stark, wobei hier nur kleine Mergelgerölle im Mittelsand auftraten. Der "Obere Mergel" erscheint am Marienplatz und am Sendlinger-Tor-Platz.

In allen Mergelpaketen sind bis zu 3 m mächtige Flinsandlinsen mit einer mehr oder weniger großen Ausdehnung eingeschaltet. Es handelt sich überwiegend um schluffige Feinsande oder seltener, bei größeren Mächtigkeiten, um schluffige Fein-Mittelsande. Im Aufschluß gehen sie ohne scharfe Grenze über schluffige bis stark schluffige Feinsande in stark sandige Schluffe (Staubsande und Sandmergel) und schließlich in sandige, tonige Schluffe (Mergel) über (Abb. 16).

Die Tertiäroberfläche fällt im Untersuchungsgebiet unregelmäßig von S nach N ab (Beilage 1, III). Mit 515.60 m NN wird in der Gegend des Goetheplatzes die höchste, mit 488.30 m NN in Freimann (Betriebshofgelände) die tiefste Lage der Tertiäroberfläche erreicht. Die quartären Schotter decken ein ziemlich bewegtes "Tertiärrelief" ein und haben sich örtlich in den tertiären Untergrund einge-

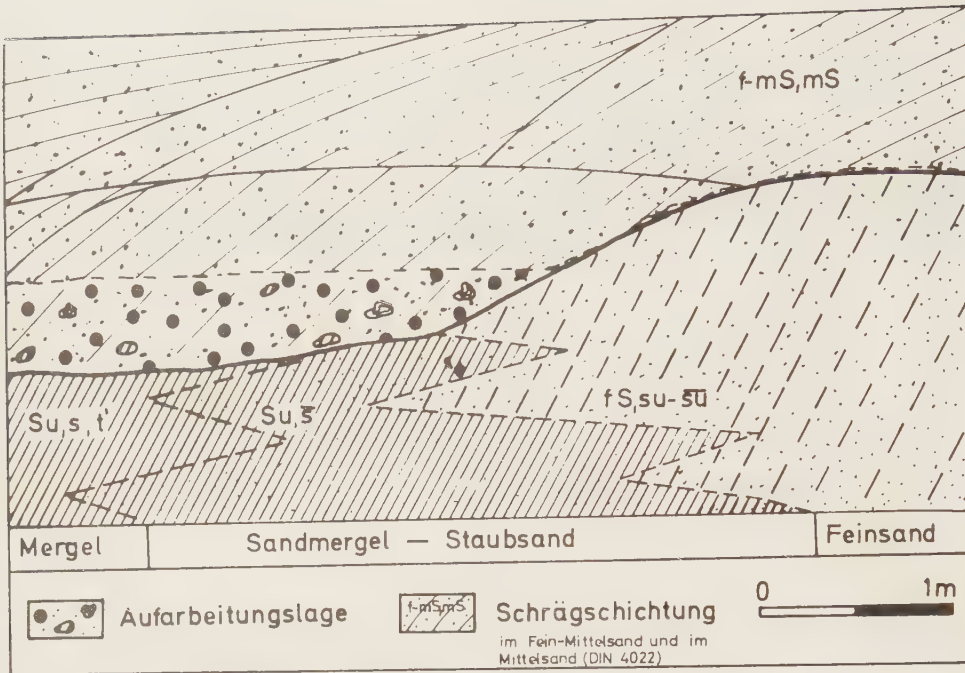


Abb. 16 Lokale Erosionsdiskordanz und Fazieswechsel
in jungtertiären Sedimenten (Baulos 4) -
Die Abkürzungen bezeichnen die Bodenarten nach der
Din 4022; die Darstellung der Bodenarten richtet sich nach
der Din 4023. Die in der Schriftleiste angegebenen Sedi-
mentbezeichnungen entsprechen der geologischen Nomen-
klatur.

tieft (Abb. 17). Die größten Reliefunterschiede treten in der Innenstadt auf, wo die relative Hochlage des Tertiärs auch eine verhältnismäßig starke Gliederung der Tertiäroberfläche bedingt. In Beilage 1, III ist die Grenzfläche Tertiär/Quartär nach den bisher bekannten Bohrungen als Tiefenlinienplan dargestellt. Es handelt sich um ein idealisiertes Relief, denn natürlich sind nicht alle Kuppen, Rücken, Kolke und Rinnen durch Bohrungen erfaßt. Die Genauigkeit der Darstellung hängt im wesentlichen von der Dichte der Bohrungen ab.

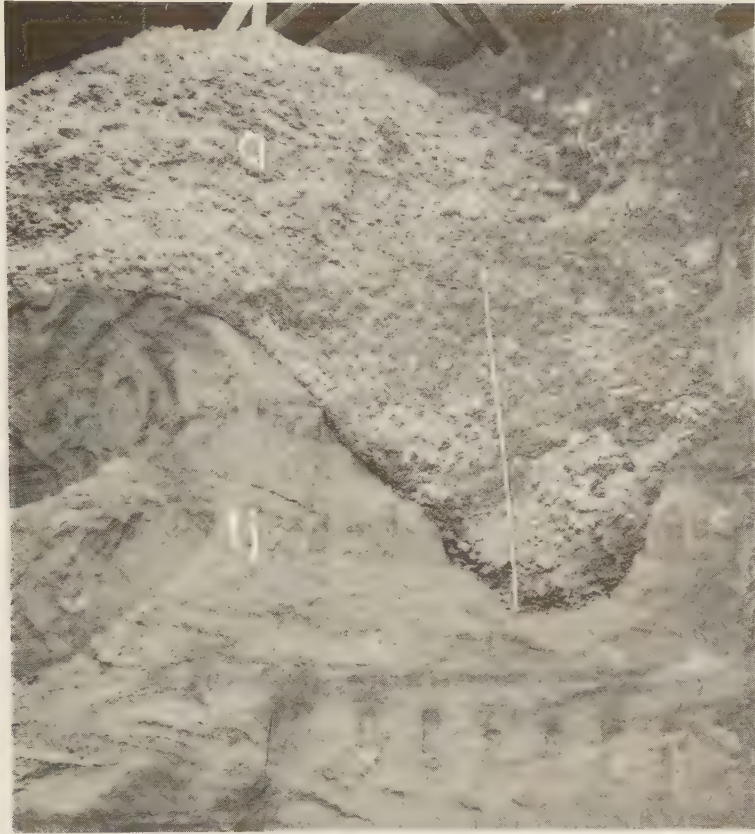


Abb. 17 Grenze Quartär/Tertiär am Stachus, Ecke Prielmayerstraße
beim Königshof (Quartär = q, Jungtertiär = tj)

III. Die Grundwasserverhältnisse

1. Allgemeiner Überblick

1.1 Wichtige hydrologische Begriffe

Nachdem in der Hydrologie die Begriffe oft verschiedenartig gebraucht werden, erscheint es einleitend notwendig, die Fachausdrücke, die in den folgenden Abschnitten vorkommen, zu definieren und die allgemeinen Erscheinungen zu beschreiben. Im wesentlichen geschieht dies in Anlehnung an KOEHNE (1948) und an die DIN 4049.

Unter Grundwasser ist dasjenige Wasser zu verstehen, das Hohlräume der Erdrinde zusammenhängend ausfüllt und nur der Schwere und dem hydrostatischen Druck unterliegt.

Grundwasserleiter sind grundwasserführende Gesteinskörper.

Grundwasserstockwerke sind übereinanderliegende, durch schwer- oder wasserundurchlässige Schichten voneinander getrennte Grundwasserleiter (Tafel 6).

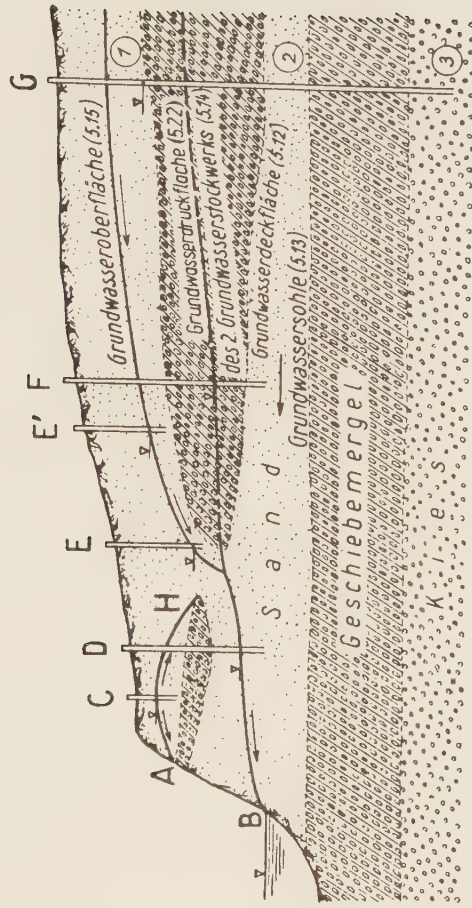
Die Grundwasserschirmfläche ist die Grenzfläche zwischen einer undurchlässigen und einer durchlässigen Schicht, wobei die durchlässige Schicht nicht bis zu dieser Grenzfläche mit Grundwasser erfüllt ist.

Die Grundwasserdeckfläche ist die Grenzfläche zwischen einem Grundwasserleiter, der gespanntes Grundwasser führt, und einer darüberliegenden schwer- oder undurchlässigen Schicht.

Die Grundwasserdruckfläche ist die Fläche, welche die Druckspiegel eines Grundwasserstockwerks, das gespanntes Grundwasser führt, miteinander verbindet.

Die Grundwasserganglinie ist die zeichnerische Darstellung von Grundwasserbeobachtungswerten (Terminwerte oder Mittelwerte) in der Reihenfolge ihres zeitlichen Auftretens. Terminwerte sind Beobachtungswerte zu einem regelmäßigen Zeitpunkt. Die Hoch- (HW) und Niedrigwasserstände (NW) in einer Zeitspanne (Jahr, Halbjahr, Monat u. a.) werden als Extremwerte oder Grenzwerte bezeichnet. Mittelwasserstände (MW) sind arithmetische Mittel von Wasserständen.

Drei Grundwasserstockwerke (5.14). Bei C, E und E' Grundwasserspiegel (5.16), die dem ersten Grundwasserstockwerk (5.14) angehören und zugleich die Lage der Grundwasseroberfläche (5.15) anzeigen. Das Grundwasser (5.02) dieses ersten Stockwerks (5.14) tritt bei A zutage, gelangt unterhalb von H in das zweite Grundwasserstockwerk (5.14) und speist es außerdem bei E. Das Grundwasser (5.02) dieses zweiten Stockwerks (5.14) tritt bei B zutage, ist bei F gespannt (5.19) und bei D ungespannt (5.20) aber abgeschirmt (5.18). Die Sohle (5.13) des zweiten Grundwasserstockwerks (5.14) wird durch Geschiebemergel gebildet. Darunter liegt ein drittes Stockwerk (5.14) mit überall gespanntem Grundwasser (5.19). Der Druckspiegel (5.23) ist durch den Brunnen (5.61) G aufgeschlossen.



Tafel 6 Zur Definition "Grundwasserstockwerke" (entnommen aus DIN 4049).

Die Ziffern hinter den hydrologischen Begriffen geben die Gliederung der DIN 4049 wieder.

Die "extreme Schwankung" ist die Differenz zwischen dem höchsten (HW) und dem tiefsten Grundwasserstand (NW) eines Jahres.

Grundwasserhöhengleichen sind Kurven gleicher und gleichzeitiger Höhen der Grundwasserstände, bezogen auf eine waagrechte Ebene, meist Normal Null.

Die Grundwasserbewegungsrichtung ist die allgemeine Verschiebungsrichtung des Grundwassers rechtwinkelig zu den Grundwassergleichen.

1.2 Hydrogeologie

Im Stadtgebiet München sind - durch Pegel und Baugrundbohrungen erfaßt - mehrere Grundwasserstockwerke vorhanden (Tafel 7, Beilage 1, I).

In der Regel liegt das obere Grundwasserstockwerk in den meist gut durchlässigen Fein- bis Grobkiesen des Quartärs. Zum Teil bildet für dieses Grundwasserstockwerk der praktisch wasserundurchlässige Flinzmergel die Grundwassersohle. Stellenweise liegen jedoch ohne Zwischenschaltung wasserundurchlässiger Schichten grundwasserführende, meist nur gering durchlässige Flinzsande direkt unter den quartären Schottern. Das Grundwasser in diesen Flinzsanden gehört noch zum oberen Grundwasserstockwerk und der hydraulische Zusammenhang zwischen dem Grundwasser in diesen tertiären Sanden und in den quartären Schottern ist erwiesen. Trotzdem wirken diese grundwasserführenden Flinzsande wegen ihrer relativ geringen Durchlässigkeit im Vergleich zu den stark wasserführenden Grobkiesen in gewissem Sinn auch gleichzeitig stauend für das Grundwasser im quartären Schotter. Das obere Grundwasserstockwerk besteht also stellenweise aus zwei in ihren Durchlässigkeiten und damit in ihren Grundwasserergiebigkeiten völlig verschiedenen Grundwasserleitern.

Das obere Grundwasserstockwerk hat eine unterschiedliche Mächtigkeit. Sie ist bedingt durch die verschiedene Höhenlage der Flinzmergelschichten und durch das unruhige Relief der Tertiäroberfläche. Die quartären Schotter haben sich nämlich in einzelnen Bereichen "rinnenartig" in die Tertiäroberfläche eingetieft, so daß sich längs dieser Zonen größere Schottermächtigkeiten und damit auch größere Grundwassermächtigkeiten ergeben (Abb. 17). Der allgemein übliche Begriff "Rinne" für örtliche Eintiefungen des Quartärs ist streng ge-

nommen nicht immer zutreffend, weil bei einer morphologischen Rinne die Länge wesentlich größer als die Tiefe und Breite sein sollte, und die Tiefe in der Regel größer sein sollte als die Breite. Dies läßt sich aber in unserem Fall nur für kleine, örtliche Eintiefungen nachweisen (Abb. 17). Bei großräumigeren Eintiefungen des Quartärs dagegen handelt es sich um mehr oder weniger große Ausräumungszonen, die mit überdurchschnittlich mächtigen Schottern aufgefüllt wurden und die bisher aber nur über relativ kleine Bereiche verfolgbar sind. So weist eine der bekanntesten "Rinnen" in der Nähe der Von-der-Tann-Straße bei einer Breite von ca. 80 m nur eine maximale Tiefe von ca. 15 m auf (Tafel 8). Der Begriff "Rinnen" stammt aus den üblichen, überhöhten Profildarstellungen, er hat sich jedoch in der Praxis eingebürgert und wird daher auch in dieser Arbeit verwandt.

In den "Rinnen" ergeben sich im Quartär Grundwassermächtigkeiten bis zu 8 m, während außerhalb der "Rinnen" nur Mächtigkeiten zwischen 0 und 2 m im quartären Schotter vorkommen. Solche mehr oder weniger ausgeprägten "Rinnen" wirken für die angeschnittenen Tertiärsande wie eine Drainage: das Grundwasser aus diesen Flinzsanden tritt in die benachbarten quartären Schotter der Rinne über. Die Grundwasseroberfläche in den tertiären Sanden spiegelt sich mehr oder weniger rasch nach den Grundwasserständen in den "Rinnen" aus.

Örtlich kann der stauende Flinzmergel kuppenartig die Grundwasseroberfläche des oberen Grundwasserstockwerks überragen, decken oder abschirmen (Beilage 1, I und II).

Tiefere Grundwasserstockwerke liegen in jenen Flinzsanden, die durch stauende Flinzmergelschichten vom oberen Grundwasserstockwerk getrennt sind. Diese Flinzsande führen fast immer gespanntes Grundwasser. Die Zahl der durch die Erkundungsbohrungen erfaßten Grundwasserstockwerke ist je nach dem geologischen Aufbau des Untergrundes von Ort zu Ort verschieden (Beilage 1, I).

Aus dem Verhalten der einzelnen Druckspiegel der tieferen Grundwasserstockwerke kann in vielen Fällen eine Aussage über den Zusammenhang der einzelnen grundwasserführenden Sandkörper gemacht werden. In den Bohrungen auf der Altstadtstufe liegen die einzelnen Grundwasserdruckflächen, bezogen auf NN, um so tiefer, je tiefer der Grundwasserleiter liegt (Tafel 7). Die Steighöhen



Bodenarten (DIN 4023)

- Kies** ($K_i > 20\text{mm}$)
- gKi+st** **Großkies + Steine**
- mKi** **Mittelsand**
- fKi** **Feinkies**
- Sand** ($S = 0.06 - 2.0\text{mm}$)
- gS** **Grobsand**
- mS** **Mittelsand**
- fS** **Feinsand**
- Schluff** ($Su: 0.02 - 0.06\text{mm}$)
- Ton** ($T < 0.002\text{mm}$)

Beimengungen

- $< 15\text{ Gew. -\%}$ = schwach ($s'su:t'$)
- $> 30\text{ Gew. -\%}$ = stark (s, su, t')

Ausbildung

- Kalkschotter** ($fKi - gKi, s - s, st$)
- Quarzschotter** ($fKi - mKi, s - s$)
- Flinzsand:**
 - Mittelsand(mS)/Fein-u.Mittelsand ($fS - mS$)
 - Feinsand, schluffig ($fS, su - sS$)
- Flinzmergel** ($Su, s' - s, t' - t'$)
- Ton, mangeliger Ton, Mergellon, tonige Mergel, Mergel, (nach Pettijohn)**

Hydrologische Beurteilung

- Durchlässigkeitgrad**
 - große Durchlässigkeit ($> 10^{-3}\text{ m/s}$)
 - mittlere ($10^{-3} - 10^{-5}\text{ m/s}$)
 - geringe ($10^{-5} - 10^{-7}\text{ m/s}$)
 - sehr geringe ($10^{-7} - 10^{-9}\text{ m/s}$)
 - praktisch undurchlässig ($< 10^{-9}\text{ m/s}$)
- Grundluftzone**
- Druckspiegel**

Sediment

- Quartärer Kalkschotter**
- Tertiärer Quarzschotter**
- Tertiärer Mittelsand**
- Tertiärer Fein-u. Mittelsand**
- Tertiärer Feinsand**
- Tertiärer Grobschluff, stark sandig, (Staubsand)**
- Tertiäre Schluffe**
- Quartäre Schotter u. tertiäre Sande**

Mittelwert k:

- ($1.0 \cdot 10^{-2}\text{ m/s}$)
- ($5.0 \cdot 10^{-4}\text{ m/s}$)
- ($3.0 \cdot 10^{-5}\text{ m/s}$)
- ($5.1 \cdot 10^{-6}\text{ m/s}$)
- ($2.0 \cdot 10^{-8}\text{ m/s}$)
- ($—$)
- ($2.0 \cdot 10^{-9}\text{ m/s}$)

Tafel 7 Hydrogeologisches Schemaprofil längs der Nord-Süd-Trasse nach den Ergebnissen der Erkundungsbohrungen

(= Abstand der Grundwasserdruckfläche von der Grundwasserdeckfläche) nehmen in der Regel mit zunehmender Tiefenlage des Grundwasserleiters zu (Beilage 1, I).

Wie in einem Mehrfachpegel der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde im Englischen Garten (Isaralluvium) zu beobachten ist, kann der Druckspiegel eines tieferen Grundwasserstockwerks jedoch unter bestimmten morphologischen und geologischen Umständen auch höher (0.50 m) liegen als die freie Grundwasseroberfläche des oberen Grundwasserstockwerks. Dieser Effekt ist hier durch die verschiedenen Einzugsgebiete der beiden, in diesem Pegel erfaßten, Grundwasserstockwerke bedingt, wobei sich hier die morphologische Terrassenkante Altstadtstufe/Isaralluvium auswirkt.

Es ist sicher, daß zwischen den einzelnen Grundwasserstockwerken natürliche und künstlich entstandene Verbindungen bestehen. Solche natürlichen Verbindungen können gegeben sein durch tief eingeschnittene Rinnen in das Tertiär, durch besondere Lagerungsverhältnisse innerhalb des Tertiärs (innertertiäre Erosionsreliefs) oder durch sandige "Fenster" in den stauenden Flinzmergeln (Beilage 1, I). Künstlich können Verbindungen zwischen den einzelnen Grundwasserstockwerken durch Tiefbauten, Ausschachtungen oder Bohrungen bedingt sein (sog. hydraulischer Kurzschluß).

2. Grundwasserganglinien und Extremwerte

2.1 Grundwasserganglinien

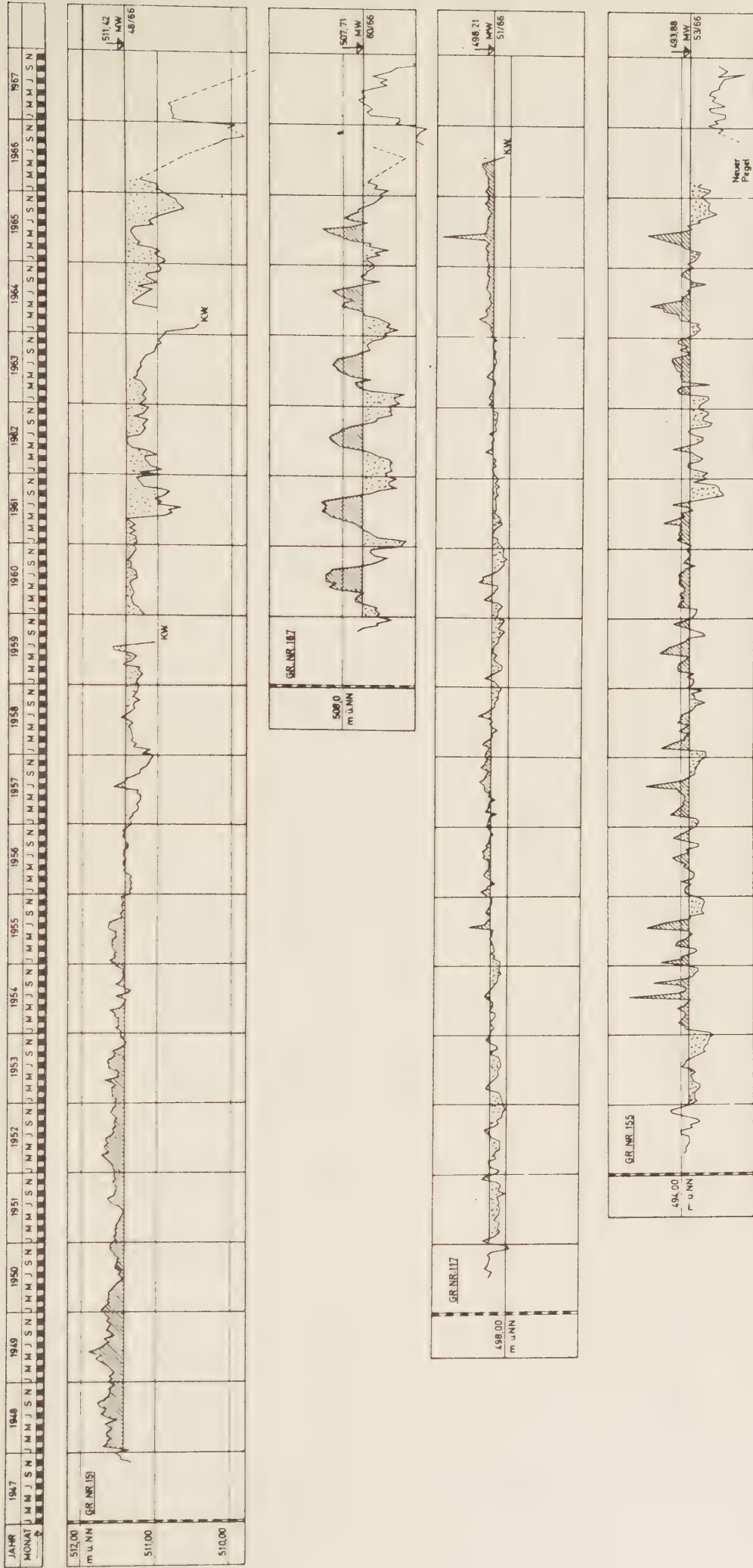
Längs der ca. 12 km langen Nord-Süd-Trasse zwischen Freimann und Sendlinger-torplatz liegen nur wenige, langjährig beobachtete Grundwasserpegel. In Tafel 9 sind die Grundwasserganglinien von vier Grundwassermeßstellen dargestellt. In der Tafel 10 sind die Monatsmittel des Isarwasserstandes und die Monatssummen des Niederschlags angegeben. Zum Vergleich zeigt die Tafel 11 zwei Ganglinien der Münchner Schotterebene. Die Meßstelle 250 Neuried liegt südlich des Stadtkerns von München, etwa 2 km südwestlich des Waldfriedhofs, die Grundwassermeßstelle 269 Hochmutting dagegen nördlich von München, ca. 1,5 km nordöstlich der Siedlung Hasenberggl. Die Beobachtung erfolgt durch den Landesgrundwasserdienst.

Schon ein erster Vergleich der Ganglinien des Stadtgebiets (Tafel 9) zeigt, daß sich die einzelnen Pegel in den Charakteristika ihres Ganges weitgehend voneinander unterscheiden. Der klassische Gang mit NW im Winter und HW im Frühjahr und Sommer ist praktisch nicht konsequent verwirklicht. Der Gang des Grundwasserspiegels hängt neben klimatischen und geologischen Gegebenheiten vor allem von künstlichen Beeinflussungen ab.

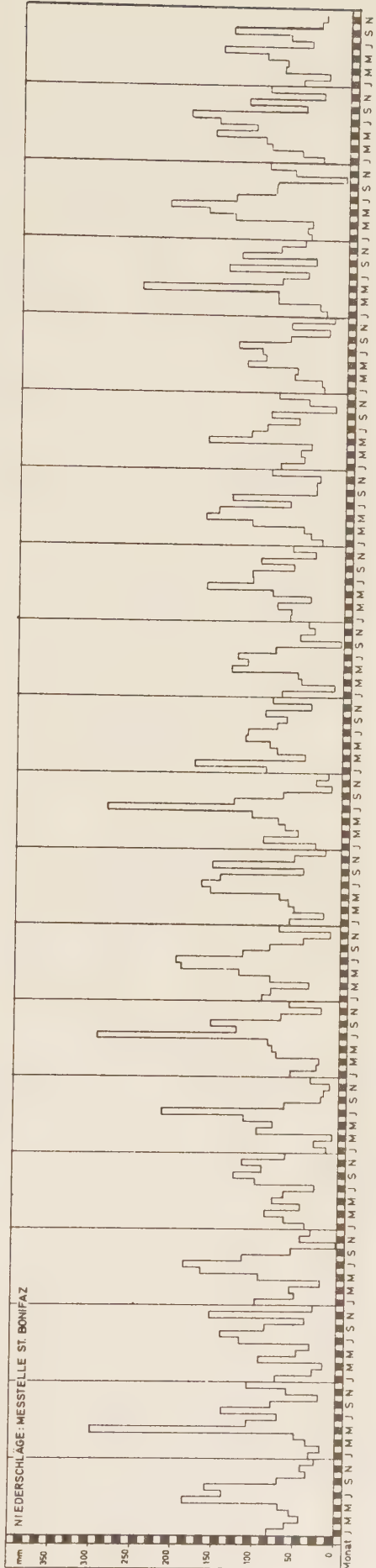
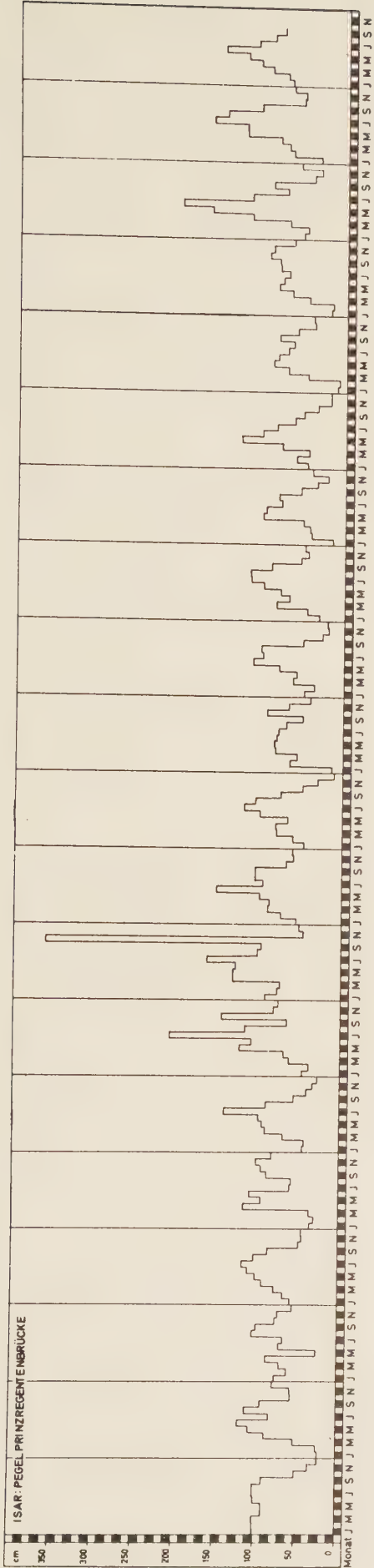
Vergleicht man die Ganglinien von Pegeln im Stadtgebiet (Tafel 9) mit typischen Ganglinien von Pegeln aus der Schotterebene (Tafel 11), so lassen sich wohl einige gleichlaufende Tendenzen erkennen. Es fällt aber auf, daß im Stadtgebiet sich gewisse hydrologische Erscheinungen kaum auswirken, wie z. B. die raschen Anstiege in den Pegeln der Schotterebene nach den Hochwässern der Jahre 1954 und 1965. Auch ähneln sich die beiden Ganglinien der 20 km auseinanderliegenden Pegel der Schotterebene untereinander viel mehr als die Ganglinien der relativ nahe beieinander liegenden Stadtpegel. Sicherlich sind dafür die dichte Bebauung in der Stadt, die hier eine Versickerung der Niederschläge in den meisten Gebieten fast ausschließt, und die ausgleichende Wirkung des nahegelegenen Vorfluters (Isar) dafür verantwortlich.

Eine direkte Beeinflussung der Grundwasserstandshöhen im Stadtgebiet durch die Isarwasserstände ist nur an manchen Pegeln auf dem Isaralluvium und auch dort meist nur, wo die Isar sich noch nicht ins Tertiär eingetieft hat, nachweisbar. Über dieses Problem dürften die Pegel der S-Bahn, deren Trasse in West-Ost-Richtung quer zur Isar verläuft, im Laufe einer langjährigen Beobachtung wertvolle Erkenntnisse bringen.

Wie die Abbildung 18 zeigt, sanken die Wasserstände der Isar von 1858 bis 1887 ständig ab. 1858 war nämlich die Flußregulierung der Isar beendet. Durch die Verringerung der Breite des Flußbettes und durch eine weitgehende Begradigung des Flußlaufes tiefte sich die Isar mehr und mehr bis ins Tertiär ein. Dadurch wiederum entwickelte sich ein dauerndes Gefälle vom Grundwasser zum Fluß und schließlich stellte sich eine Erniedrigung des Grundwasserspiegels im benachbarten Stadtgebiet ein. Die Grundwasserspiegel im Bereich der U-Bahn-Trasse auf der Altstadtstufe sind heute mit Sicherheit unabhängig von den Isarwasserständen.



Tafel 9 Ganglinien von vier Grundwassermeßstellen längs der Nord-Süd-Trasse
(14tägige Beobachtung durch die Stadtentwässerung)



Kalender- jahr	1948	1949	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967
Abfluß- jahr	1948	1949	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967

Tafel 10 Ganglinien der Monatsmittel des Isarwasserstandes (Pegel Prinzregentenbrücke) und der Monatssummen des Niederschlags (Messstelle St. Bonifaz)

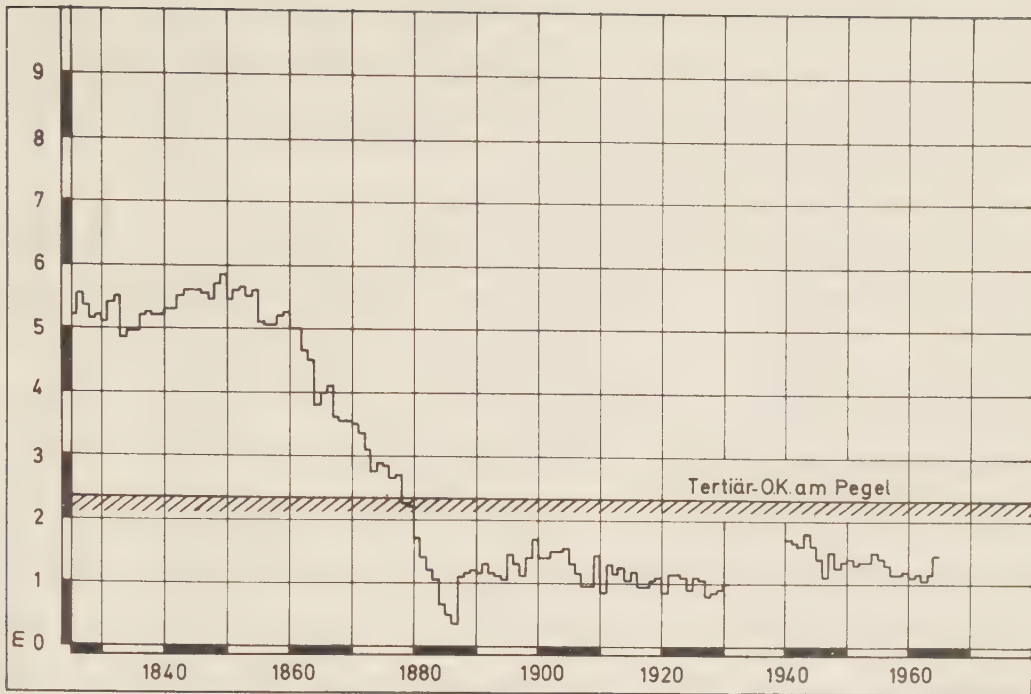


Abb. 18 Ganglinie der Jahresmittel des Isarwasserstandes am Pegel Bogenhausener Brücke

Die Überbauung im Stadtgebiet, die Isarregulierung und die dadurch bedingte Eintiefung der Isar, der Kanalbau und die ständige Grundwasserentnahme durch private Brunnen führten im Laufe der Zeit zu einer generellen Grundwasserabsenkung im Stadtgebiet.

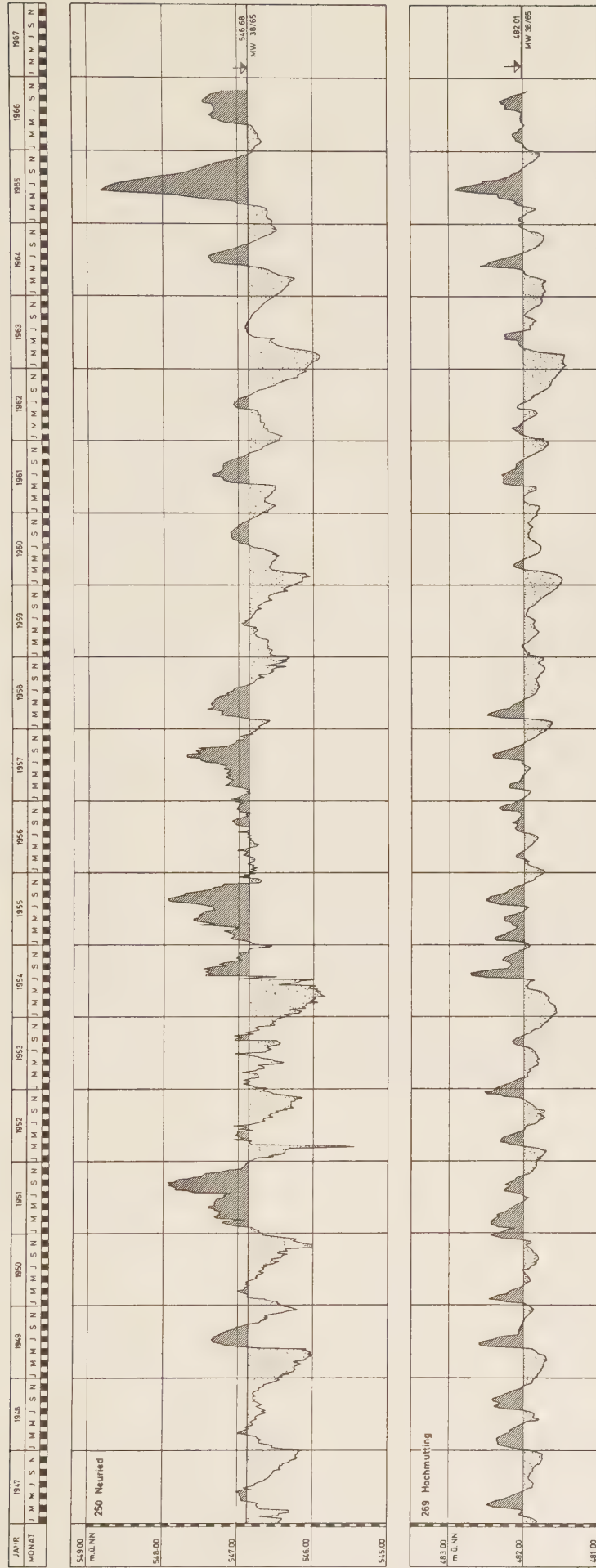
Der Grundwasserpegel GR 151 (Tafel 9) liegt in der Innenstadt auf der Altstadtstufe (Polizeipräsidium, Ettstraße). Seine Ganglinie zeigt seit den Grundwasserhochständen kurz nach 1945 ein dauerndes Absinken: der Grundwasserspiegel lag von 1957 an ständig unter dem langjährigen Mittel. Wahrscheinlich versickern in diesem dicht bebauten Gebiet überhaupt keine Niederschläge mehr, so daß von der Oberfläche her mit einem Grundwasserzuwachs praktisch nicht mehr zu rechnen ist. Besonders wirkte sich hier der Wiederaufbau nach dem zweiten Weltkrieg aus. Die Ganglinie zeigt keinerlei Zusammenhang mit dem Gang der Niederschläge oder den Isarwasserständen. Seit 1966 wurde die Ganglinie durch die Grundwasserabsenkung des U-Bahn-Baus beeinflusst. Der bisher

beobachtete Höchststand (HHW) nach dem zweiten Weltkrieg lag im Juni 1949 bei 511.90 m NN, ein natürlicher Tiefststand (NNW) dürfte im September 1965 bei 510.82 m NN erreicht worden sein. Das Trockenfallen des Pegels GR 151 im März/April 1964 und im Herbst 1959 dürfte durch künstliche Eingriffe in das Grundwasser bedingt sein.

Der Entnahmebrunnen des Heizkraftwerks München-Nord dient als Grundwasserspiegel GR 167 (Tafel 9) und liegt im bebauten Stadtgebiet. Die Ganglinie zeigt einen für die Lage des Pegels im Innenstadtgebiet ungewöhnlich großen Schwankungsbereich: die extreme Schwankung liegt zwischen 0.8 und 1.2 m. Der Jahresgang des Wasserstandes scheint mit seinen Tiefständen im Dezember/Januar und seinen Hochständen Juni/Juli der Verteilung der Niederschläge direkt zu entsprechen. Es handelt sich jedoch nicht um eine durch natürliche Faktoren geprägte Ganglinie. Der Brunnen ist für Kühlzwecke im allgemeinen von August bis März in Betrieb. Die Tiefstände seines Wasserstandes sind also nicht durch den jahreszeitlichen Gang des Grundwassers bedingt. Außerdem ist zu beachten, daß bei der 14tägigen Ablesung meist ein Betriebswasserspiegel im Brunnen beobachtet wird, der nicht repräsentativ ist für die Grundwasseroberfläche. Nur aus der Ganglinie eines mit einem Schreibgerät ausgerüsteten Brunnens, die eine dauernde Registrierung des Wasserstandes im Brunnen ermöglicht, kann der Ruhewasserspiegel während der Betriebsruhe des Brunnens erfaßt werden.

Eine Fremdbeeinflussung des Grundwasserspiegels durch einen in der Nähe liegenden Brunnen zeigt auch die monatliche Ganglinie des Pegels NS 465 (Tafel 12). Der Pegel wird durch einen ca. 240 m entfernt liegenden Brunnen deutlich beeinflusst: die Betriebs- und Ruhezeiten des Brunnens sind an der Ganglinie ohne weiteres abzulesen. Durch die wöchentliche Ablesung wurde der effektive Ruhewasserspiegel im Pegel NS 465, der sich nur über das Wochenende zumindest angenähert einstellt, nicht erfaßt. Die Differenz zwischen den wöchentlichen Ablesungen und dem eigentlichen Grundwasserstand betrug maximal 0.40 m (Tafel 12).

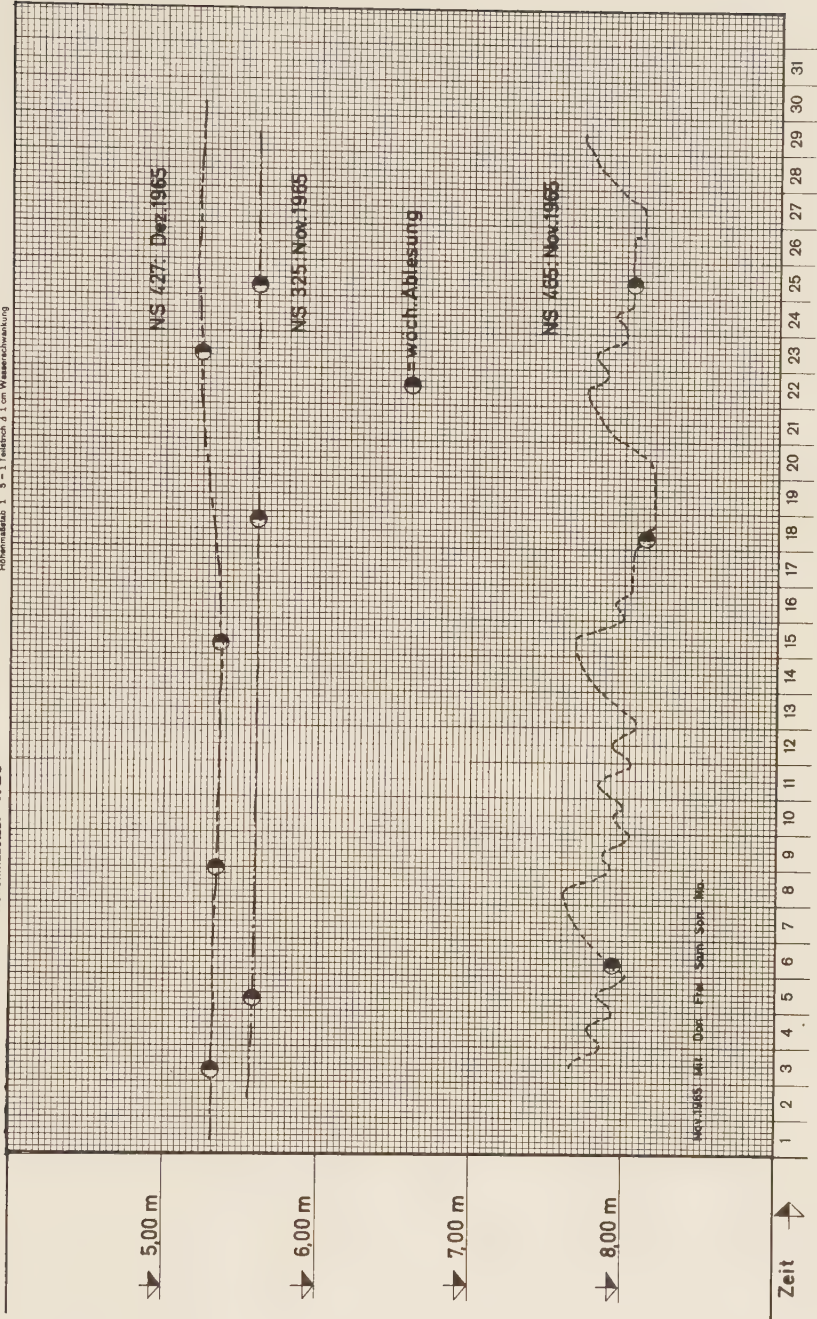
Der Pegel GR 117 (Tafel 9) beim Israelitischen Friedhof liegt im Nordteil der Nord-Süd-Trasse; er wurde seit dem Jahre 1940 mit einer Unterbrechung von 1944 bis 1949 im 14tägigen Abstand beobachtet. Die Schwankungen sind relativ gering; der Tiefstand (NNW) wurde im Jahre 1950 mit 497.95 m über NN



Höhenmaßstab: 1:20 = 1 Teilstrich 4 cm Wasserschwankung
Höhenmaßstab: 1:15 = 1 Teilstrich 3 cm Wasserschwankung
Höhenmaßstab: 1:10 = 1 Teilstrich 2 cm Wasserschwankung
Höhenmaßstab: 1:5 = 1 Teilstrich 1 cm Wasserschwankung

Zeitmaßstab: 1 Teilstrich = 4 Std. (32 Tage Umlauf)
Höhenmaßstab: 1:20

Abstich



Tafel 12 Monatliche Ganglinien der mit Schreibgeräten ausgerüsteten Grundwasserpegel NS 465, NS 427 und NS 327

erreicht; die Hochstände lagen im allgemeinen bei 498.40 m über NN. Ein außerordentlicher Höchststand (HHW) im Mai 1965 ist wahrscheinlich nur ein Ablesefehler. Vielleicht läßt sich dieser Hochstand aber auch theoretisch erklären, denn der Mai war relativ niederschlagsreich mit mehreren Starkregenfällen. Möglicherweise haben diese Starkregen zu der kurzfristigen Grundwasserspitze geführt. Die Umgebung dieses Pegels ist wenig bebaut und ein unmittelbarer Einfluß der Versickerung der Niederschläge erscheint hier im Gegensatz zu den Pegeln GR 151 und GR 167 möglich. Auch für die Starkregen im Juni 1965 spricht eine Spitze in der Ganglinie. Entspricht diese Deutung den tatsächlichen Gegebenheiten, so müßte die Ganglinie des Pegels GR 117 wohl öfters kurzfristige Hochstände aufweisen, die größeren Niederschlägen entsprechen. Dies ist jedoch nicht der Fall. Man könnte aber vermuten, daß solch kurzfristige Grundwasserhochstände bei einer 14tägigen Ablesung nicht alle erfaßt werden.

Der Pegel GR 155 (Tafel 9) lag etwa 800 m nordöstlich des Pegels GR 117 auf dem Isaralluvium; er wurde 1967 zerstört. Die Ganglinie dieses Pegels wird am deutlichsten durch die Niederschläge beeinflusst (Tafel 10; vgl. 1954/1957/1964/1965). Das Gebiet um diesen Pegel herum war bis jetzt weitgehend unbebaut. Eine unmittelbare Versickerung der Niederschläge war daher möglich. Eine direkte Abhängigkeit vom Wasserstand der Isar ist unmöglich, da die Isar sich hier in das Tertiär eingetieft hat und somit nicht mehr im Schwankungsregime mit dem Grundwasser steht. Die Unterschiede der Ganglinie GR 117 und GR 155 sind wohl im wesentlichen durch eine mögliche Stauwirkung des Hauptabwasserkanals bedingt, der zwischen den beiden Pegeln in Nord-Süd-Richtung längs der Ungererstraße verläuft und der in das Tertiär einbindet, während seine Oberkante über die Grundwasseroberfläche emporragt. Zum Teil kann jedoch auch die verschiedene Lage der Pegel GR 117 und GR 155 auf zwei verschiedenen geologischen Körpern (Altstadtstufe und Isaralluvium) hier beeinflussend wirken. Der Höchststand (HHW) des Pegels GR 155 lag nach dem Krieg bei 494.72 m NN, der Niedrigwasserstand (NNW) bei 493.35 m NN.

2.2 Hoch- und Tiefstände

Die Extremwerte (HW und NW) der Jahre 1951 bis 1965 (Tafel 13) von fünf Pegeln längs der Trasse sind als Punkte in den beiden mittleren Diagrammen

eingetragen. Die einzelnen Punkte wurden statistisch mit einer Einheitsfläche ($1/100$) ausgezählt. Die Zonen verschiedener Besetzungsdichte sind durch unterschiedliche Rasterung gekennzeichnet. Zum Vergleich sind rechts davon die minimalen und maximalen Monatssummen des Niederschlags (Meßstelle St. Bonifaz) und links davon die mittleren Grenzwerte des Isarwasserstandes (Meßstelle Prinzregentenbrücke) aufgetragen. Wie aus den Diagrammen der Belegdichte hervorgeht, fallen die Hochstände des Grundwassers überwiegend in die Monate Juni/Juli; das Maximum der Niedrigwasserstände liegt im Dezember und im Januar. Dieser Befund stimmt ungefähr mit dem überein, der in den schon erwähnten Pegeln der Münchner Schotterebene (Tafel 11) sich zeigte.

Das zeitliche Auftreten der Hoch- und Tiefstände des Grundwassers im oberen Grundwasserstockwerk des Abflußjahres 1966 ist für 54 Pegel der südlichen Hälfte der Nord-Süd-Trasse (Odeonsplatz mit Sendlinger-Tor-Platz) in einem Häufigkeitsdiagramm in Abbildung 19 eingezeichnet. Die häufigsten Hochstände liegen im Sommer zwischen Juni und August, während die Tiefstände im September und Oktober erreicht werden. Allerdings kommen auch aus dem Rahmen fallende Werte vor, wie z.B. HW im September/Dezember und NW im Juni/Juli.

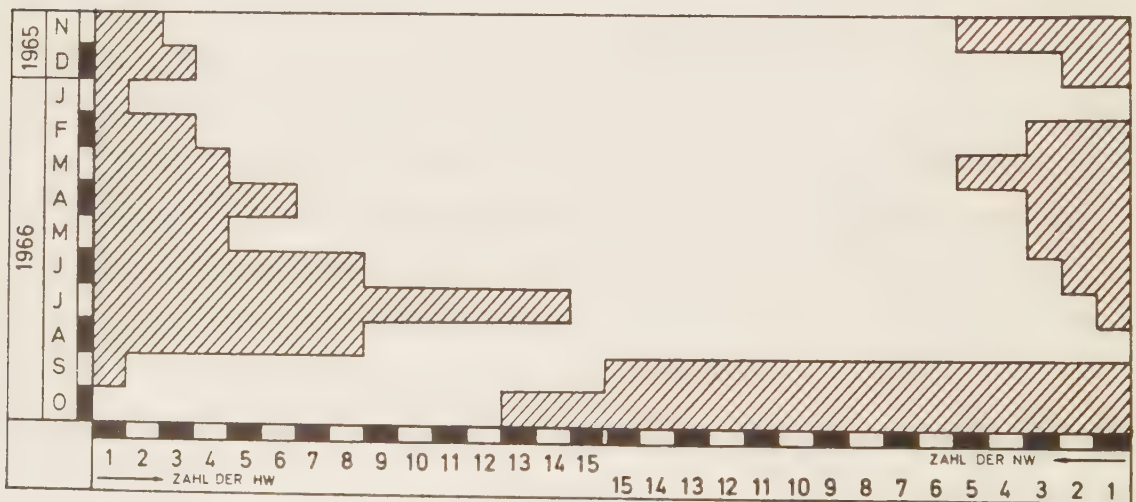


Abb. 19 Zeitliches Auftreten der Hoch- und Tiefstände des Grundwassers im oberen Grundwasserstockwerk im Abflußjahr 1966 (54 Pegel)



Tafel 13 Das zeitliche Auftreten der maximalen und minimalen Isarwasserstände, der Hoch- und Tiefstände von fünf langjährig beobachteten Grundwassermeßstellen und der maximalen und minimalen Monatssummen des Niederschlags

In Tafel 13 ist die zeitliche Verschiebung der Extremwerte von 1957 bis 1965 auffällig: die Hochstände treten bis 1957 meist in den Monaten Juli bis August auf, während sie von 1957 bis 1965 in den Monaten Mai bis Juni erscheinen. Diese gleiche Verschiebung zeigt sich zumindest bei den maximalen Monatssummen der Niederschläge und den maximalen Monatsmitteln der Isarwasserstände. Möglicherweise wirken sich hier in größeren Beobachtungszeiträumen klimatische Faktoren sowohl bei den Grundwasserständen, wie auch in der Isarwasserführung aus. Die Diagramme der Belegdichte der Grundwasserstände zeigen freilich gelegentlich eine Streuung der Extremwerte. Ein Teil der aus dem Rahmen fallenden Daten, wie z.B. Niedrigwasserstände im Juli, ist sicherlich durch zeitweilige künstliche Eingriffe bedingt.

2.3 Extreme Schwankungen

Die extremen Schwankungen der Jahre 1958 bis 1964 von 23 Ganglinien des oberen Grundwasserstockwerks im Innenstadtgebiet sind in der Abbildung 20 eingetragen. Der häufigste Schwankungsbereich liegt danach zwischen 0.30 und 0.50 m; die Streuung der durch natürliche Grundwasserstandsschwankungen bedingten Werte reicht von 0.05 bis ca. 1.00 m. Schwankungen über 1.00 m treten nur vereinzelt auf und sind entweder auf künstliche Einwirkungen oder auf gespanntes Grundwasser zurückzuführen. Zum Vergleich sei noch darauf hingewiesen, daß die extremen Schwankungen in der Münchner Schotterebene östlich der Isar je nach den örtlichen Gegebenheiten zwischen 10.1 und 3.7 m betragen (SCHIRM 1968).

Die extremen Schwankungen im oberen Grundwasserstockwerk des Abflußjahres 1966 sind für 50 Grundwasserpegel des südlichen Abschnittes der Nord-Süd-Trasse zwischen Odeonsplatz und Goetheplatz in der Abbildung 21 als Häufigkeitsdiagramm dargestellt. Ungefähr 72 % der Pegel weisen eine extreme Schwankung zwischen 0.20 und 0.70 m auf. Hohe Werte über 1.30 m finden sich bei Pegeln, die entweder eine große Mächtigkeit des quartären Schotters (über 7.00 m) und damit eine relativ große Grundwassermächtigkeit durchteufen, (extreme Schwankungen: 2.10 m; 1.90 m; 1.70 m; 1.50 m), oder in Pegeln, in denen ein Druckspiegel beobachtet wird (extreme Schwankungen: 2.40 m; 1.90 m; 1.30 m).

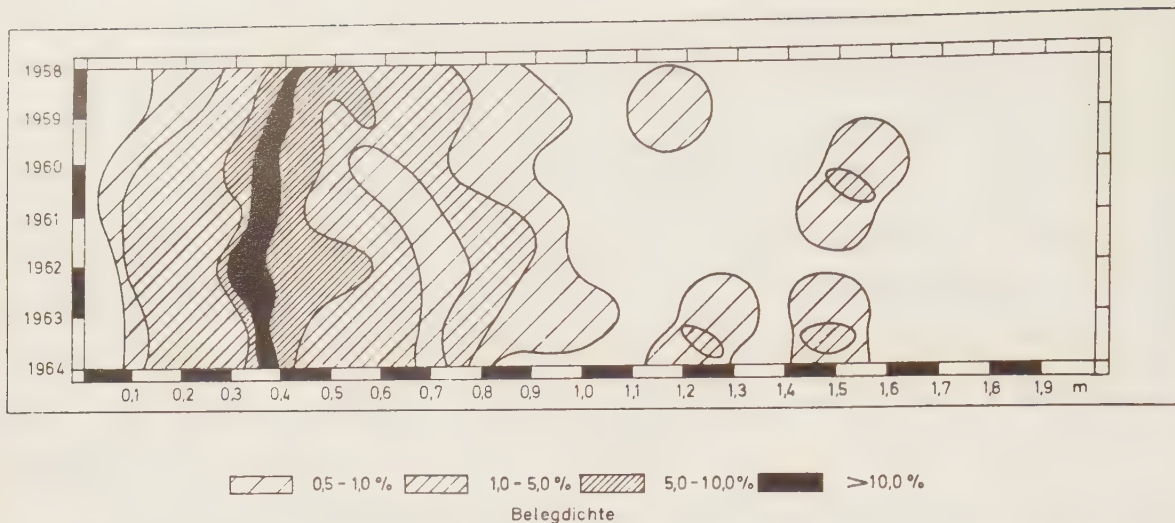


Abb. 20 Extreme Schwankungen im oberen Grundwasserstockwerk des Innenstadtgebietes (23 Pegel)

Die in der Regel geringen Schwankungen des Grundwasserstandes im Innenstadtgebiet sind wohl durch drei Faktoren bedingt: durch die örtliche Bebauung, die eine unmittelbare Versickerung der Niederschläge verhindert, durch die meist geringe Grundwassermächtigkeit in den Schottern des Quartärs und lokal auch durch die ausgleichende Vorfluterwirkung der Isar bzw. die Wirkung des tieferliegenden Isaralluviums.

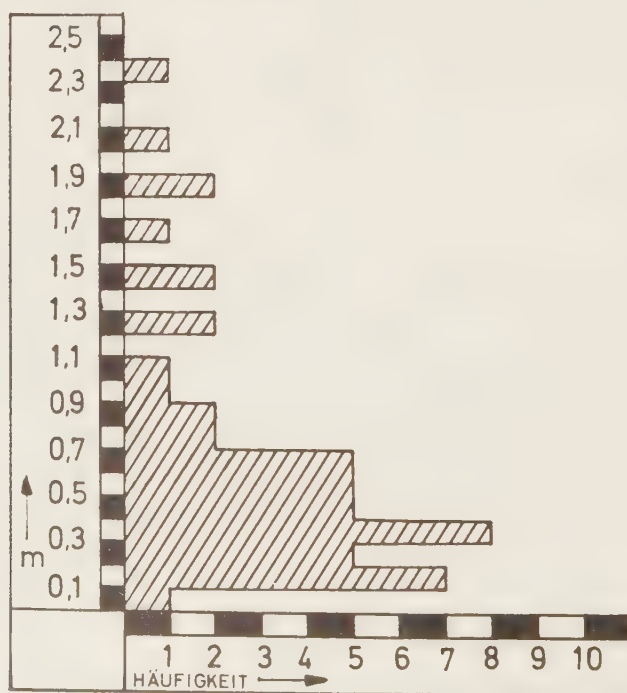


Abb. 21 Extreme Schwankungen in 50 Grundwasserpegeln (Abflußjahr 1966)

Die extremen Schwankungen der Druckspiegel tieferer Grundwasserstockwerke im Tertiär sind erheblich größer als die Schwankungen im oberen Grundwasserstockwerk. Hier kommen extreme Schwankungen zwischen 1.00 und 4.00 m vor. Aus der Übereinstimmung der Ganglinien von Druckspiegeln und der Ganglinien von Pegeln im oberen Grundwasserstockwerk kann manchmal auf einen hydrogeologischen Zusammenhang der verschiedenen Grundwasserstockwerke geschlossen werden.

3. Filtergeschwindigkeit des Grundwassers

Die Filtergeschwindigkeit v_f ist definiert als diejenige Wassermenge, die in der Zeiteinheit (= Durchfluß) durch die Fläche eines rechtwinkelig zur Fließrichtung liegenden Querschnitts strömt (Tafel 14). Sie ist also nicht die Geschwindigkeit eines Wasserteilchens, sondern die Geschwindigkeit einer Wassermenge. Solange das Wasser durch den Porenraum eines wassergesättigten Leitergesteins laminar strömt, ohne die Textur des Bodens zu verändern (vgl. IV, 4,5), gilt die von Darcy gefundene Beziehung:

$$v_f = k \cdot J \quad (\text{m/Tg})$$

v_f = Filtergeschwindigkeit
 k = Durchlässigkeitsbeiwert
 J = hydraulisches Gefälle

Neben der Filtergeschwindigkeit finden sich in hydrologischen Arbeiten auch noch andere Definitionen für die Geschwindigkeit des Grundwassers:

Die Bahngeschwindigkeit ist die wirkliche Geschwindigkeit eines Grundwasserteilchens (Tafel 14). Sie ist erheblich größer als die Filtergeschwindigkeit, da dem Grundwasser nicht der volle Querschnitt, sondern nur der darin enthaltene nutzbare Porenraum als Fließquerschnitt zur Verfügung steht.

Die Abstandsgeschwindigkeit ist definiert als die mittlere horizontale Fließgeschwindigkeit des Grundwassers zwischen zwei Beobachtungspunkten (Tafel 14).

In homogenen Bereichen des Grundwasserleiters kann aus der Abstandsgeschwindigkeit und dem nutzbaren (effektiven, oder wirksamen) Porenraum die Filtergeschwindigkeit berechnet werden. Es gilt die Beziehung:

$$v_f = n' \cdot v \quad (\text{m/Tg})$$

v_f = Filtergeschwindigkeit

n' = nutzbarer Porenraum

v = Abstandsgeschwindigkeit

Diese verschiedenen Grundwassergeschwindigkeiten dürfen jedoch nicht mit der Schnelligkeit von Druckübertragungen im Grundwasser verwechselt werden. Das plötzliche Ansteigen von Grundwasserständen in Pegelrohren ist kein Maß für die Fortbewegungsgeschwindigkeit.

3.1 Untersuchungsmethode

Unter der Voraussetzung, daß der Strömungswiderstand des Filters eines Grundwasserpegels geringer ist als der umgebende Grundwasserleiter, ist die Filtergeschwindigkeit v_f durch Tracermethoden in einem einzigen Filterrohr bestimmbar.

Bei der Methode MOSER, NEUMAIER u. RAUERT (1965) wird das Grundwasser im Filterrohr mit radioaktiven Isotopen (Brom ⁸², Jod ¹³¹) markiert. Da das Filterrohr ständig von frischem, nicht markiertem Grundwasser durchströmt wird, nimmt die Konzentration des radioaktiven Tracers im Meßvolumen infolge ständiger Verdünnung im Laufe der Zeit ab. Unter der Voraussetzung einer guten Durchmischung des Tracers im Meßvolumen und einer horizontalen Durchströmung des Filters ist die Filtergeschwindigkeit der Konzentrationsabnahme des Tracers proportional und kann berechnet werden:

$$v_f = \frac{v_0}{\alpha \cdot F \cdot t} \lg \text{nat} \frac{c_0}{c_t} \quad (\text{MOSER, NEUMAIER u. RAUERT 1965})$$

c_0 = Anfangskonzentration des Tracers

c_t = Tracerkonzentration zur Zeit t

α = Korrekturfaktor, der das Verhältnis der Stromliniendichte im Filterrohr zu der im ungestörten Grundwasserleiter angibt

v_0 = Meßvolumen im Filterrohr, unter Berücksichtigung des Detektorvolumens

F = Querschnittsfläche des Meßvolumens im Filterrohr

Die Konzentrationsabnahme im Pegelrohr wird in gewissen Zeitabschnitten jeweils mit einem Strahlungsdetektor gemessen. Die Höhe des Meßvolumens beträgt 0.25 oder 0.50 m. Auf diese Weise ist es möglich, einen Grundwasserleiter mit Hilfe von Packeranordnungen in seiner ganzen Länge abzutasten

Die drei Geschwindigkeitsbegriffe beim Grundwasser:

Bahngeschwindigkeit eines Grundwasserteilchens

$$= \frac{\text{wahre Weglänge}}{\text{Zeit zwischen I und II}}$$



Abstandsgeschwindigkeit der Grundwasserteilchen

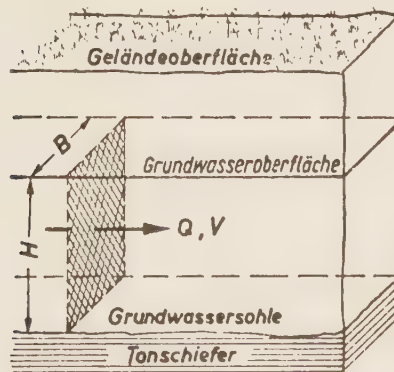
$$= \frac{\text{Abstand } a}{\text{Zeit zwischen I und II}}$$



Durchgangsgeschwindigkeit (Filtergeschwindigkeit) eines Grundwasserkörpers

$$v = \frac{Q}{F}$$

$$F = H \cdot B$$



Tafel 14 Zur Definition der Grunwassergeschwindigkeiten
(entnommen aus DIN 4049)

und so in Meßstrecken von 0.25 m Länge die Filtergeschwindigkeit zu bestimmen. Die Meßgenauigkeit liegt bei etwa 10 %. Nachteilig bei dieser Methode ist, daß nur bei einem sorgfältigen Bohrlochausbau wirklich reelle Werte erzielt werden können. Verockerungen an Metallfiltern, Schlamm oder Sand im Filterkies, einseitige oder sonstwie fehlerhafte Kiesschüttungen und Ausbrüche an der Bohrlochwand führen ebenso wie ungenaue Angaben im Bohrprofil zu unrichtigen Ergebnissen und Deutungen. Besonders in älteren Pegeln besitzen die festgestellten Werte aus obengenannten Gründen meist nur wenig Aussagewert.

Außerdem können in Filterrohren, die Schichten verschiedener Durchlässigkeiten oder verschiedenen Wasserdrucks (gespannte Grundwässer) durchteufen, Vertikalströmungen auftreten, die die Meßergebnisse verfälschen. Aus solchen Meßwerten errechnet sich dann im allgemeinen eine zu hohe Filtergeschwindigkeit.

3.2 Untersuchungsergebnisse

3.21 Filtergeschwindigkeiten des Grundwassers im Quartärkies

Im Rahmen der Voruntersuchungen zur Erkundung des Münchner Untergrunds im Zusammenhang mit dem U-Bahn-Bau wurden 1957 und 1964 in einer Anzahl von 2"-Pegeln des Innenstadtgebietes die Filtergeschwindigkeit durch die Forschungsstelle für Radiohydrometrie, München, bestimmt. Neuere Ergebnisse von 1960 wurden überwiegend in den für diese Untersuchungen besser geeigneten 4"-Grundwasserbeobachtungsrohren gewonnen. Zum Teil sind hier auch Unterlagen der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde ausgewertet worden. In der Abbildung 22 sind die Ergebnisse der drei Meßreihen in Histogrammen dargestellt. Einzelne typische Pegel zeigen die Tafeln 15 und 16.

In den quartären Kiesen wurden Filtergeschwindigkeiten zwischen 0.3 und 13 m pro Tag gemessen (Abb. 22). Die niedrigen Werte ≤ 0.5 m/Tag wurden meist dicht über der Tertiäroberfläche festgestellt, wo die quartären Kiese häufig noch aufgearbeitetes tertiäres Material enthalten. Es treten in diesen Lagen schluffige oder stark sandige Kiese auf. Ein Teil dieser niedrigen Werte könnte aber auch durch Verockerung der Filterrohre oder durch Ungenauigkeiten bei den Teufenangaben der Tertiäroberfläche (zu tief !) in den Bohrprofilen bedingt sein.

Die höchsten Werte (> 6 m/Tag) wurden in Pegeln gemessen, in denen eine relativ hohe Grundwassermächtigkeit (> 4 m) festzustellen war (vgl. "Rinnen", II, 1.2). Hier ist die Wahrscheinlichkeit, daß besonders gut durchlässige Riesellagen im Meßprofil auftreten, am größten. Dies zeigt der Pegel E 2 der Tafel 15. Die Filtergeschwindigkeit liegt hier in 4.20 m u. Gel. bei 2.5 m/Tag, ein für den sandigen Quartärkies durchaus üblicher Wert. In 4.50 m u. Gel. wurden dagegen 8.5 m/Tag gemessen. Hier hat das Meßvolumen wohl sicher eine besonders durchlässige Riesellage des Schotters erfaßt. Dieser Pegel ist ein gutes Beispiel für die unterschiedlichen Durchlässigkeiten im Vertikalprofil der quartären Schotter. Ähnlich liegen die Verhältnisse im Pegel NS 564 (Tafel 16). Obwohl im Bohrprofil kein Hinweis auf Riesellagen zu finden ist, zeigten die nur 5 m von der Bohrung entfernten Aufschlußwände der Baugrube tatsächlich eine ausgesprochene Wechsellagerung von 0.20 bis 0.30 m mächtigen, praktisch sandfreien Riesellagen und zum Teil stark verschlufften, sandreichen Kieslagen. Die Messungen bei 9.00 m und 10.50 m u. Gel., erfaßten ein oder mehrere solcher Riesellagen und ergaben so die hohen Filtergeschwindigkeiten von 7 und 8 m/Tag.

Außergewöhnlich hohe Werte von 23 oder gar 30 m/Tag, die vereinzelt auftraten, sind entweder, wie schon erwähnt, durch zusätzliche Vertikalströmungen im Filter oder in Einzelfällen vielleicht auch auf die Dränwirkung von Kanälen oder Stadtbächen zurückzuführen. In beiden Fällen entsprechen diese Werte nicht den normalen, natürlichen Filtergeschwindigkeiten im Grundwasserleiter, sondern stellen örtliche Besonderheiten dar.

Die Häufigkeit der mittleren Werte zwischen 1 und 3 m/Tag hängt damit zusammen, daß in den meisten untersuchten Pegeln des Innenstadtbereichs die Grundwassermächtigkeit im Quartär nur zwischen 0.8 und 1.9 m betrug. Gerade in diesem Bereich nahe der Tertiäroberkante kann aber die Durchlässigkeit durch umgelagertes Tertiärmaterial noch beeinträchtigt sein. Zum andern ist bei diesen kurzen Untersuchungsprofilen die Wahrscheinlichkeit solcher Riesellagen geringer als bei den großen Grundwassermächtigkeiten, denn in diesem Fall wurde meist nur eine Messung pro Pegel durchgeführt.

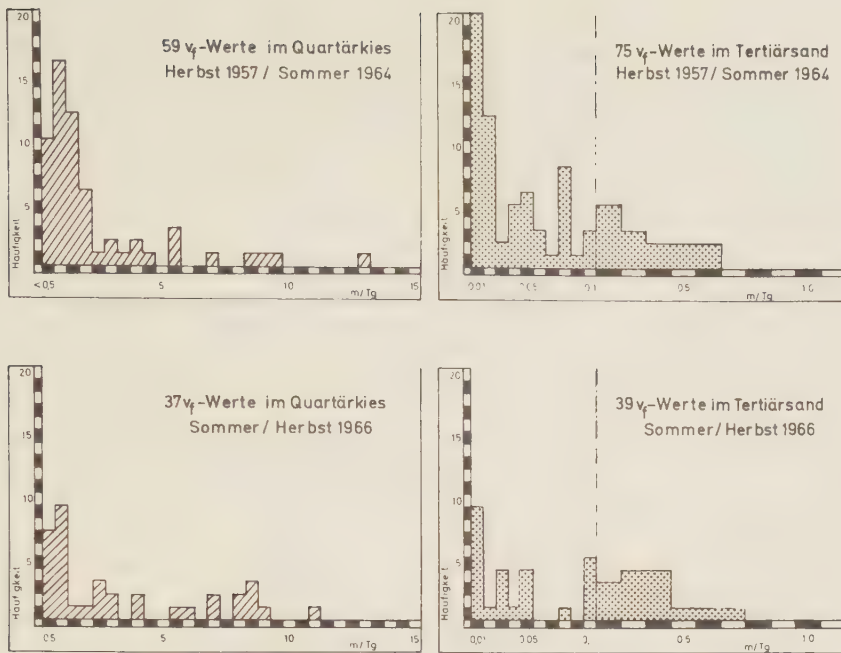


Abb. 22 Nach der Methode MOSER, NEUMAIER u. RAUERT (1965)
gemessene Werte der Filtergeschwindigkeiten des
Grundwassers

Als Mittelwert errechnet sich für den Quartärkies aus den Untersuchungsergebnissen von 1957 und 1964 eine Filtergeschwindigkeit von 2.43 m/Tag. Bei diesen Pegeln überwiegen diejenigen mit einer geringen Grundwassermächtigkeit. Außerdem ist möglicherweise ein Teil der niedrigen Werte durch Verockerung bedingt. Solche Erscheinungen sind an den älteren 2"-Pegeln nachgewiesen. Der Mittelwert aus den neueren Messungen von 1966 ergab 3.18 m/Tag, wobei die Messungen in der bereits erwähnten Rinne an der Von-der-Tann-Straße höhere v_f -Werte zeigen. Auch kann die Möglichkeit nicht ausgeschlossen werden, daß die alluvialen Schotter des Englischen Gartens, deren Meßwerte ebenfalls mit eingerechnet sind, möglicherweise etwas durchlässiger sind als die Schotter der Altstadtstufe.

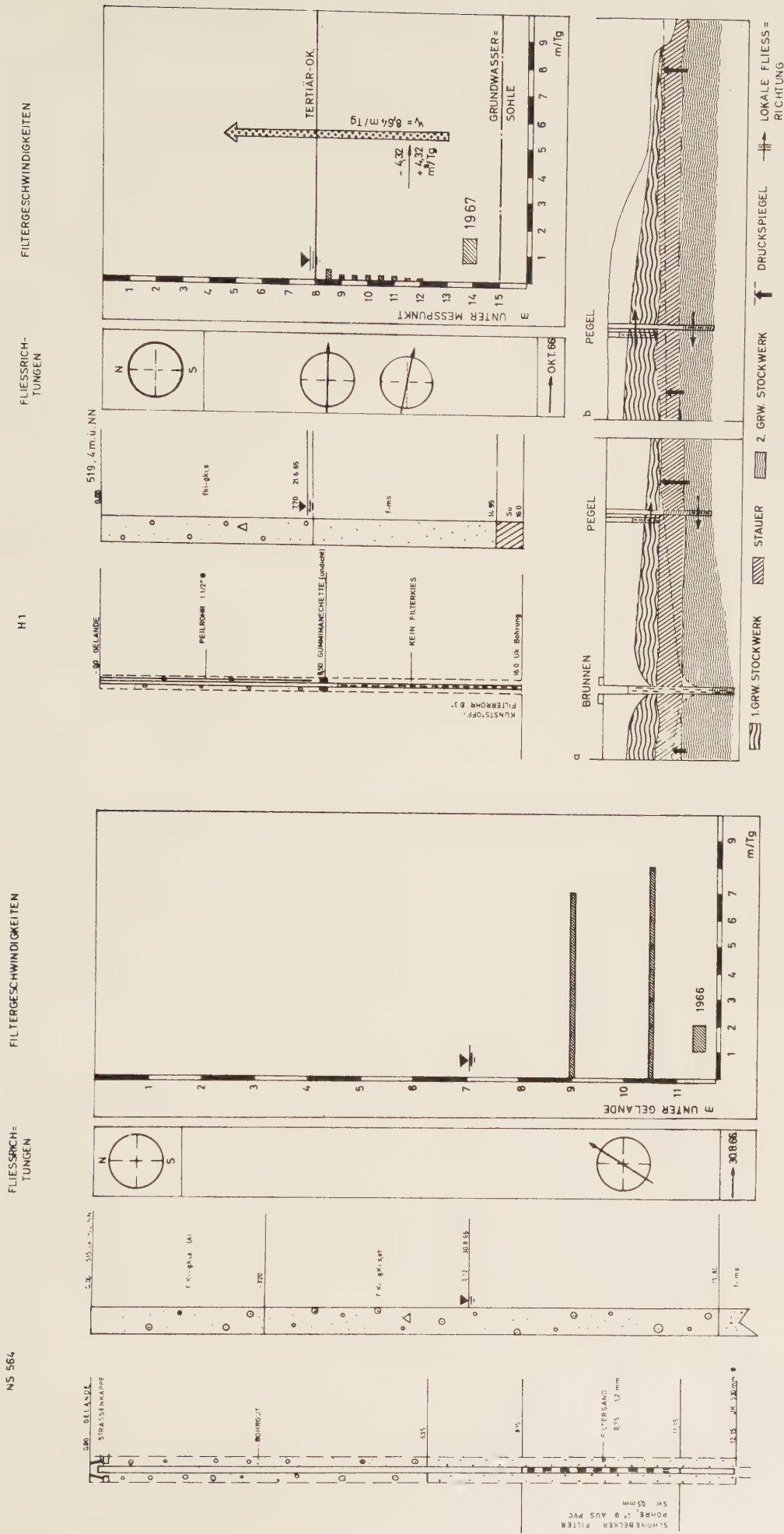
3.22 Filtergeschwindigkeiten des Grundwassers im Tertiärsand

Die Filtergeschwindigkeiten des Grundwassers in den jungtertiären Sanden des Münchner Untergrundes sind erheblich geringer als die in den quartären Schottern. Nach den Messungen von 1957, 1964 und 1966 ergaben sich Geschwindigkeiten zwischen 0.01 und 0.70 m/Tag (Abb. 22). In einzelnen Fällen wurden 1967

im Stadtgebiet auch höhere Filtergeschwindigkeiten bis 1.70 m/Tag festgestellt. Der Vergleich mit den entsprechenden Bohrproben aus dem untersuchten Filterbereich zeigte, daß im allgemeinen den tertiären Mittelsanden Filtergeschwindigkeiten über 0.1 m/Tag entsprechen. Eine Zuordnung der gemessenen Filtergeschwindigkeiten zu den in Abschnitt II, 3.2 entwickelten Haupttypen der Tertiärsande läßt sich im einzelnen jedoch nicht durchführen, da für die Meßpunkte im Profil meist keine entsprechenden Bodenproben vorliegen. Als Mittelwert für die Tertiärsande errechnet sich aus den Messungen 1957 und 1964 eine Filtergeschwindigkeit von 0.12 m/Tag, aus den Messungen 1966 eine solche von 0.16 m/Tag. Insgesamt ergibt sich ein Mittelwert von 0.14 m/Tag.

Wie das Profil E 3 der Tafel 15 zeigt, wurden im Tertiär vereinzelt auch höhere Werte, und zwar solche zwischen 0.8 und 1.7 m/Tag, festgestellt. Diese Werte sind jedoch möglicherweise durch Vertikalströmungen mitbedingt. Sie wurden an Pegeln festgestellt, die, wie z. B. E 3, mehrere Grundwasserstockwerke kurzschließen. In solchen Fällen ist, sofern eines oder mehrere Grundwasserstockwerke gespanntes Wasser führen, mit der Möglichkeit von Vertikalströmungen im Rohr oder im ummantelnden Filterkies zu rechnen.

Eine andere Erklärung für diese hohen v_f -Werte liegt in einem unsachgemäßen Abteufen und Ausbauen des Bohrlochs. Wird die Deckschicht eines Grundwasserstockwerks, das gespanntes Grundwasser führt, durchbohrt, so tritt im Bohrloch im Moment des Durchschlags eine mehr oder weniger starke, nach aufwärts gerichtete Grundwasserströmung auf. Diese aufwärts gerichtete Strömung führt zum Aufschwimmen von mehr oder weniger großen Sandmengen (vgl. IV, 3). Auf diese Weise können unter der Deckschicht unregelmäßige Kavernen unterschiedlicher Größe entstehen. Solche Erscheinungen sind beim Trägerbohren und auch bei Erkundungsbohrungen des U-Bahn-Baues häufig beobachtet worden. In älteren Schichtverzeichnissen findet man manchmal die, auf den ersten Blick unerklärlich scheinende, Bezeichnung "Hohlraum" oder "Höhle" (freundl. mündl. Mitt. von H. Dipl. Geol. G. MEIER). Da im Moment des Durchstoßens der Deckschicht der Bohrmeißel infolge des Aufschwimmens des gewichtslos gewordenen Sandes um einen gewissen Betrag (bis 0.5 m) durchfällt, ist die Angabe der Bohrmeister erklärlich.



Tafel 16 Pegelausbau, Bodenprofil, Filtergeschwindigkeiten und "lokale" Fließrichtungen in den Grundwasserpegeln NS 564 und H 1

Durch dieses Aufschwimmen des Sandes ist der Querschnitt des Bohrlochs an dieser Stelle nicht mehr kreisrund, sondern er ist durch unregelmäßige Kavernen vergrößert, die beim Pegelausbau durch Filterkies später verfüllt werden. Unregelmäßige Bohrlochquerschnitte können auch bei im ungespannten Grundwasser anstehenden Tertiärsanden durch eine nicht vollständige Verrohrung des Bohrloches bedingt sein. Da aber eine zylindrische Geometrie des Bohrloches bei der Bestimmung der Filtergeschwindigkeiten vorausgesetzt wird, führen solche Schwimmsandkavernen bei der v_f -Messung zu falschen Ergebnissen.

Andere überdurchschnittliche Meßwerte wurden bei drei Pegeln relativ dicht unter der Tertiäroberkante festgestellt. Sie entsprechen in ihrer Größenordnung noch den im Quartärkies gemessenen Werten:

Tabelle 11 Filtergeschwindigkeiten in der Nähe der Tertiäroberkante (= TOK)

Pegel	v_f (m/Tag)	Meßpunkt
NS 693	1.70	0.35 m unter TOK
NS 683	1.10	0.40 m unter TOK
210	1.10	0.11 m unter TOK

Hier handelt es sich wahrscheinlich um Ungenauigkeiten in den Teufenangaben der Bohrprofile. Bei der Nachprüfung an Hand von Baugrubenaufschlüssen wurden Abweichungen in der Teufenangabe der Tertiäroberkante von ± 0.80 m des öfteren festgestellt. Bei Spülbohrungen (Absenkbrunnen) kann der Fehler in der Angabe der Teufen der Schichtgrenzen der tertiären Sedimente noch erheblich größer sein (bis zu 3 m!).

Es wäre jedoch theoretisch auch möglich, daß das Bodengefüge durch den Bohrvorgang im Bereich der Schichtgrenze Quartärkies/Tertiärsand mechanisch so gestört wurde, daß sich hier tatsächlich so hohe Filtergeschwindigkeiten ergeben. Auch in diesem Fall sind diese Werte für die Tertiärsande nicht repräsentativ und wurden deshalb in der Abbildung 22 und auch bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

4. Durchlässigkeitsbeiwerte

4.1 Quartäre Sedimente

4.11 Bestimmungsmethoden

Bei den grobklastischen Ablagerungen des Quartärs wurden Durchlässigkeitsbeiwerte aus den Ergebnissen älterer Pumpversuche und neuerer Feldversuche ermittelt. Je nach den im Einzelnen vorliegenden Unterlagen wurde der k-Wert aus zwei verschiedenen Entnahmemengen und den dazugehörigen Absenkungen (a) oder aus den Fördermengen und den beobachteten Entnahmetrichtern (b) oder nach einer Näherungsformel (c) aus der Entnahmemenge und der Absenkung berechnet (BIESKE 1965).

$$a) \quad k = \frac{(Q_2 - Q_1) \ln \frac{R}{r}}{(h_1^2 - h_2^2)} \quad (\text{m/s})$$

$$\approx 2 \frac{Q_2 - Q_1}{h_1^2 - h_2^2}$$

$$b) \quad k = \frac{Q \cdot \ln \frac{x_2}{x_1}}{2 \cdot h_m (s_1 - s_2)} \quad (\text{m/s})$$

$$c) \quad k = \frac{Q}{h_m \cdot s} \quad (\text{m/s})$$

$Q_1; Q_2$ = Entnahmemengen

$h_1; h_2$ = Abstände der abgesenkten Wasserspiegel über dem Stauer

R = Reichweite

r = Bohrlochradius

$x_1; x_2$ = Abstände der Pegel 1 und 2 von der Brunnenachse

h_m = arithmetisches Mittel aus h und H (= Grundwassermächtigkeit)

$s_1; s_2$ = Absenkung in den Pegeln 1 und 2

s = Absenkung im Brunnen

Die so errechneten Durchlässigkeitsbeiwerte sind Mittelwerte über die durchteuften Quartärprofile, wobei möglicherweise vorkommende, schlecht durchlässige Schichten nicht in die Berechnungen eingingen.

Eine weitere Möglichkeit der Bestimmung der k-Werte ist die Berechnung aus der Filtergeschwindigkeit und dem Grundwassergefälle:

$$k = \frac{v_f}{J} \text{ (m/s)}$$

k = Durchlässigkeitsbeiwert

v_f = Filtergeschwindigkeit

J = Grundwassergefälle

Für das Grundwassergefälle konnte ein ungefährer Wert aus großmaßstäblichen Darstellungen der Grundwasserhöhengleichen entnommen werden, die Filtergeschwindigkeit wurde nach der Methode MOSER, NEUMAIER u. RAUERT (1965) ermittelt (vgl. III, 2). Für das Grundwassergefälle ergaben sich in der Regel im Stadtgebiet, je nach den örtlichen und zeitlichen Gegebenheiten, Werte zwischen 1.5 und 5 ‰. In Einzelfällen wurden auch Werte von 8 ‰ festgestellt; diese treten aber nur in den tertiären Sanden auf. Die v_f -Werte (vgl. III, 2.21) gelten für den Bereich des untersuchten Meßvolumens. Es wurden, wenn mehrere Werte für das Quartärprofil einer Bohrung vorlagen, "mittlere Filtergeschwindigkeiten" errechnet. Dadurch sind diese k-Werte dann wohl noch am ehesten für die quartären Schotter repräsentativ und den aus den Pumpversuchen gewonnenen Ergebnissen annähernd vergleichbar.

4.12 Untersuchungsergebnisse

Die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte sind in der Tabelle 12 eingetragen. Die einzelnen Werte schwanken, insbesondere im Vertikalprofil der quartären Schotter, erheblich. Die stark wechselnden Sand- und Schluffgehalte bedingen, ebenso wie die verschieden häufig und in unterschiedlicher Mächtigkeit auftretenden Riesellagen, große Unterschiede in der Durchlässigkeit. Im Prinzip gelten hier dieselben Ausführungen, wie in Abschnitt III, 2.21. EXLER (1967) gibt auf Grund von Pumpversuchen bei der hydrogeologischen Erkundung der S-Bahn-Trasse für die quartären Schotter k-Werte zwischen $5 \cdot 10^{-4}$ und $4 \cdot 10^{-2}$ m/s und als Mittelwert ca. $5 \cdot 10^{-3}$ m/s an.

Tabelle 12 Vergleich der Durchlässigkeitswerte quartärer Schotter, ermittelt aus Pumpversuchen und aus der Filtergeschwindigkeit und dem Grundwassergefälle

Bodenarten	Durchlässigkeitsbeiwerte			
	Ergebnisse von Pumpversuchen		Berechnet aus v_f u. J	
	Extremwerte m/s	Mittelwert m/s	Extremwerte m/s	Mittelwert m/s
f-g Ki, s, st (Grobschotter)	$5.0 \cdot 10^{-4}$ bis $4.2 \cdot 10^{-2}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$	$2.0 \cdot 10^{-3}$ bis $4.6 \cdot 10^{-2}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$
(A) f-g Ki, s, su, st (Auffüllung)	$2.0 \cdot 10^{-4}$			

4.2 Tertiäre Sedimente

4.21 Bestimmungsmethoden

Die Durchlässigkeitsbeiwerte der Flinzsande und Flinzmergel wurden durch Laboruntersuchungen an ungestörten Bohrproben und bei den Flinzsanden durch Ausspiegelungs- und Abpreßversuche im Feldversuch bestimmt. Daneben wurden auch k-Werte der Flinzsande über die DARCYsche Formel (BIESKE 1965) aus der Filtergeschwindigkeit und dem Grundwassergefälle berechnet (vgl. III, 4.11).

Die bei den Erkundungsbohrungen entnommenen ungestörten Bodenproben wurden am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Hochschule München (Professor Dr.-Ing. R. JELINEK) untersucht. Die Durchlässigkeitsbeiwerte wurden meistens in einer Druckzelle (Probendurchmesser = 75 mm, durchströmte Länge $l = 50$ mm) nach Entlüften der Proben bei einem Korn-zu-Korn-Druck von 0.5 kp/cm^2 und bei fallender Druckhöhe ermittelt. Der im Labor ermittelte Durchlässigkeitswert gilt streng genommen nur für das entnommene Bodenvolumen. Er kann auf eine mächtigere Bodenschicht nur übertragen werden, wenn die entnommene Probe für diese Schicht auch repräsentativ ist. Nach den Erfahrungen der Feldversuche und der Grundwasserabsenkungen sind die im Labor festgestellten k-Werte oft um eine Zehnerpotenz zu gering.

Bei Feldversuchen wird der mittlere Durchlässigkeitsbeiwert von Bodenschichten größerer Mächtigkeiten erfaßt. Dabei ist eine genaue Kenntnis des Bohrprofils notwendig, um einen definierten und den rechnerischen Möglichkeiten entsprechenden Untersuchungsbereich, einen geeigneten Brunnenausbau, die wirksame Länge (die vom Wasser durchströmt wird) und einen einfachen Bereichsfaktor eindeutig und vor allem günstig festzulegen. Voraussetzung ist dabei natürlich, daß, wenn k-Werte der tertiären Sande bestimmt werden sollen, kein Grundwasser aus den quartären Schottern in die Versuchsanordnung eindringen kann. Dies ist einmal durch entsprechende Absperrungen und Dichtungen der Mantelrohre gegen den Boden zu erreichen, zum anderen ist es am günstigsten, solche Bohrungen zu wählen, in denen die quartären Schotter grundwasserfrei sind (vgl. III, 1.2 und 4). Für diese Feldversuche wird die Bohrung (ca. 146 mm) bis knapp auf die zu untersuchenden Bodenschichten voll verrohrt vorgeschrieben. Die Verrohrung wird um ca. 1 m gezogen und in den unverrohrten Teil des Bohrlochs und in den unteren Teil der Verrohrung wird dann ein ca. 1.5 m mächtiger Dichtungspfropfen eingebaut. Dieser Pfropfen wird nach dem Erhärten zentrisch mit einer Bohrung kleineren Durchmessers (ca. 52 mm) durchfahren, wobei diese Bohrung nun in die zu untersuchenden Bodenschichten vorgetrieben wird (0.50 bis 2.00 m). Nachdem das Bohrwerkzeug (z.B. Kernrohr) unter Wasserüberdruck gezogen wurde - die Wasserauflast verhindert einen hydraulischen Grundbruch im unverrohrten Bohrloch - wird das geringer dimensionierte Bohrloch mit Filterkies geeigneter Körnung verfüllt.

Beim Ausspiegelungsversuch wird in dem so ausgebauten Bohrloch der Wasserspiegel durch Abpumpen stufenweise unter den Ruhewasserspiegel abgesenkt und die Zeit des Wiederanstiegs um jeweils 0.1 m laufend gemessen. Die Durchlässigkeitsbeiwerte k lassen sich dann nach untenstehender Formel berechnen:

$$k = \frac{Q}{s \cdot C} = \frac{F \cdot H}{s \cdot C \cdot T} \quad (\text{m/s})$$

Q	=	Wassermenge pro Zeit
s	=	Absenkung
C	=	Bereichsfaktor
F	=	Eintrittsflächen
T	=	Anstiegsdauer
H	=	0.10 m

Auch der Abpreßversuch erfolgte in dem wie oben beschriebenen ausgebauten Bohrloch. Um die Wasserzuleitung nur in die vorgesehene Meßstrecke einzu-

führen, werden geeignete Packer oder ein dichter Abschlußkopf eingebaut. Dann wird Wasser unter konstantem Überdruck (0.5 und 1.0 atü) längs des vorausgebohrten Bohrloches in das Anstehende bis zum Erreichen eines Beharrungszustandes hineingedrückt. Die Wassermenge pro Zeit wird gemessen. Der k-Wert wird nach folgender Formel errechnet:

$$k = \frac{Q}{H \cdot C} \text{ (m/s)}$$

Q = Wassermenge pro Zeit
H = Überdruck in m Wassersäule
plus der Höhendifferenz
zwischen Ruhewasserspiegel
und Manometern in m
C = Bereichsfaktor

Die Ergebnisse dieser Untersuchungsverfahren sind nicht unbedingt miteinander vergleichbar, da sie von der Untersuchungsmethodik abhängen. Die bei Ausspiegelungsversuchen ermittelten Werte können infolge einer Bodenauflockerung zu groß und die der Abpreßversuche auf Grund der Verstopfung des Filters durch Schwebstoffe zu gering sein. Mit diesen Bestimmungsmethoden kann nur eine allgemeine Größenordnung für die Durchlässigkeit ermittelt werden. Aus Einzelversuchen absolute Zahlenwerte für die Durchlässigkeitsbeiwerte zu entnehmen und auf weite Bereiche zu übertragen, ist problematisch.

4.22 Untersuchungsergebnisse

Die Durchlässigkeitsbeiwerte der tertiären Sedimente sind, soweit es bei den verschiedenen Untersuchungsmethoden möglich war, nach Hauptbodenarten getrennt in der Tabelle 13 aufgeführt.

Bei den Feldversuchen können die ermittelten Durchlässigkeiten nicht mehr auf eine Hauptbodenart bezogen werden, wie es bei den Laboruntersuchungen möglich ist. Es wurden mächtigere Schichten der Fein- Mittelsande, zum Teil auch der Mittelsande erfaßt. Die Kornverteilung der untersuchten Sande liegt aber nicht für das ganze Profil vor, so daß auf eine Zuordnung der einzelnen k-Werte auf die Hauptbodenarten verzichtet werden muß (Tab. 13).

Tabelle 13 Durchlässigkeitsbeiwerte der tertiären Sedimente

Bodenart	Laborversuche		Ausspiegelungsversuche		Abpreßversuche		Berechnung aus v_f und J	
	Extremwerte m/s	Mittelwerte m/s	Extremwerte m/s	Mittelwerte m/s	Extremwerte m/s	Mittelwerte m/s	Extremwerte m/s	Mittelwerte m/s
mS, su	$7.3 \cdot 10^{-7}$ bis $4.0 \cdot 10^{-5}$	$2.7 \cdot 10^{-5}$	$6.1 \cdot 10^{-7}$ bis $9.7 \cdot 10^{-5}$	$1.4 \cdot 10^{-5}$	$2.0 \cdot 10^{-6}$ bis $5.0 \cdot 10^{-5}$	$8.0 \cdot 10^{-6}$	$2.2 \cdot 10^{-6}$ bis $2.8 \cdot 10^{-4}$	$2.5 \cdot 10^{-5}$
fS - mS, su' - su	$2.12 \cdot 10^{-8}$ bis $1.1 \cdot 10^{-5}$	$2.9 \cdot 10^{-6}$						
fS, su - $\overline{\text{su}}$	$9.3 \cdot 10^{-7}$ bis $2.5 \cdot 10^{-6}$	$1.9 \cdot 10^{-6}$	$2.5 \cdot 10^{-6}$	-	-	-	-	-
Su, s' - s, t' - t	$1.7 \cdot 10^{-10}$ bis $2.3 \cdot 10^{-9}$ ($4.5 \cdot 10^{-8}$)	$1.9 \cdot 10^{-9}$	-	-	-	-	-	-

Für die tertiären Sande gibt EXLER (1967) maximale Durchlässigkeitsbeiwerte in der Größenordnung von $6 \cdot 10^{-4}$ und $1 \cdot 10^{-5}$ m/s und einen Mittelwert von $2 \cdot 10^{-5}$ m/s an. In Einzelfällen wurden auch schon erheblich höhere Durchlässigkeitsbeiwerte bis zu $2 \cdot 10^{-3}$ m/s in den Flinzsandten festgestellt (freundliche, mündliche Mitteilung von Herrn Diplomgeologen H. HELLERER, Technische Hochschule München).

Die Durchlässigkeit hängt außer von der Untersuchungsmethode von der Lagerungsdichte, dem Porenanteil, der Kornverteilung, dem Gefüge (Kornform, Packung und Schichtung) und der Klüftung ab.

Die relativ großen Schwankungen der Durchlässigkeitsbeiwerte (Tab. 13) der sonst in ihren geotechnischen Eigenschaften ziemlich konstanten Flinzsandten kann verschiedene Ursachen haben. Neben der unterschiedlichen Körnung und vor allem dem verschiedenen Schluff- und Tonanteil spielen auch Unterschiede in der Art der Schichtung eine Rolle.

Die Flinzsandten gelten mit ihrer Lagerungsdichte von $D = 0.77 - 1.12$ als "sehr dicht" gelagert. Diese dichte Lagerung ist, da sie durch ihre regionalgeologisch gleiche Genese bedingt ist (vgl. II, 1.1), in allen Teilen eines ungestörten Profils ungefähr die gleiche.

Die Mittelwerte des Durchlässigkeitsbeiwertes hängen deutlich von der Kornverteilung und damit von der Bodenart ab (Tab. 13). Grundsätzlich gilt, daß die Bodenarten mit der kleinsten Körnung auch die geringsten Durchlässigkeiten aufweisen. Die Schwankungen der Durchlässigkeitsbeiwerte der Sandten und die Tatsache, daß Feinsandten manchmal größere Durchlässigkeitsbeiwerte in der Laboruntersuchung aufweisen können als Mittelsandten, haben ihren Grund in dem oft unterschiedlichen Gefüge der Sandten (Abb. 23). In den Mittelsandten und auch in den Fein- Mittelsandten sind die Fraktionen über 0.25 mm reich an großen Glimmerblättchen. Der Glimmer ist nicht gleichmäßig im Sediment verteilt, er reichert sich vielmehr lagenweise an (vgl. II, 3.6).

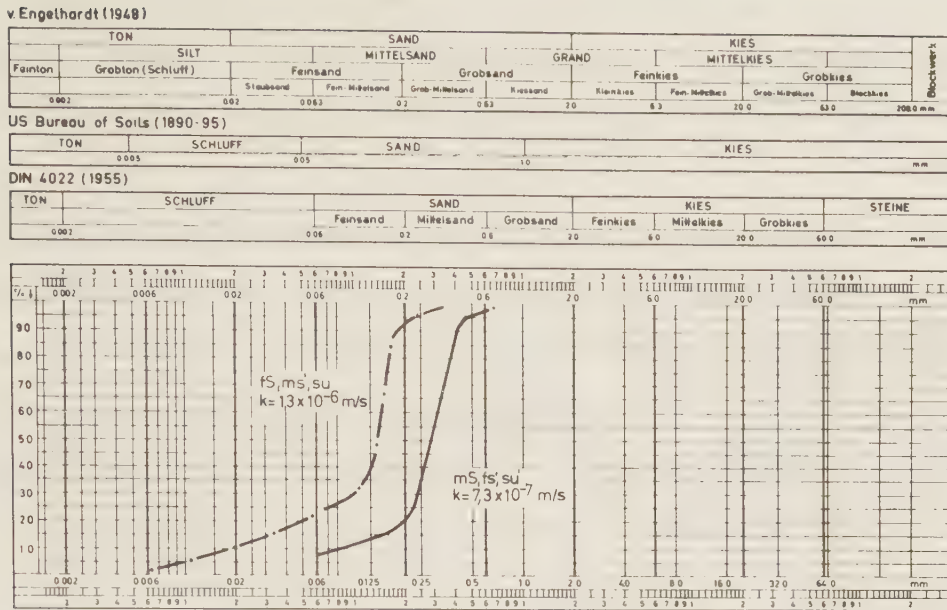


Abb. 23 Summenkurven eines Feinsandes und eines Mittelsandes mit unterschiedlichen Durchlässigkeitsbeiwerten (k)

Die Flnzsande sind, wie in Abschnitt II, 3.6 beschrieben, im Zentimeter- und Meterbereich schräg- oder kreuzgeschichtet. Verständlicherweise wird durch die Art der Schichtung die Durchlässigkeit der Sande wesentlich beeinflusst, denn die Abbildung des Gefüges erfolgt primär durch die eingeregelter Glimmerblättchen. Der k-Wert wird in solchen Fällen also nicht nur von der Körnung, sondern auch von dem Anteil der eingeregelter, großblättrigen Glimmer und von der Größe und Einheitlichkeit der einzelnen Schüttungskörper im Sediment bestimmt.

Kernbohrungen, aus denen die ungestörten Proben gewonnen werden, schneiden meist bei der stark schwankenden Kreuz- und Schrägschichtung diese unter einem zufälligen Winkel. Von diesen Winkeln des Bohrkerns mit der Schrägschichtung und der erfaßten Mächtigkeit einer Schichtungseinheit hängt die Größe des im Labor bestimmten k-Wertes ab. Da im allgemeinen nur der Durchlässigkeitsbeiwert in vertikaler Richtung bestimmt wird, so sind diese Werte, da sie nicht an nach der Schichtung orientierten Proben bestimmt wurden, in vielen Fällen nicht repräsentativ für das Anstehende. Feldversuche ergeben hier realere Werte. Die Tabelle 14 gibt Durchlässigkeitsbeiwerte an, die in Laboruntersuchungen von orientiert entnommenen Proben ermittelt wurden.

Bei den Feinsanden fehlen die Fraktionen größer als 0.25 mm mit den großen Glimmerblättchen und auch Schrägschichtung tritt nur selten auf (vgl. II, 3.6). Hier ist der Glimmer nur untergeordnet eingeregelt und es überwiegt eine ebene Feinschichtung.

Solche Effekte sind wohl die Erklärung für die größere Durchlässigkeit eines Feinsandes gegenüber der Durchlässigkeit eines gröberen Fein- Mittelsandes, wie sie in Abbildung 23 eingezeichnet ist.

Diese Überlegungen werden durch die Erfahrungen der Praxis bestätigt. Während sich im Baulos 6 in einem mittel- bis großdimensional schräggeschichteten Sandschicht ein Brunnenabstand bei der Vakuumwasserhaltung von 10 und 15 m ergab, mußte der Brunnenabstand in Baulos 9 in einer Sandschicht, die sich durch eine kleindimensionale Kreuzschichtung auszeichnete, auf ca. 6 m verringert werden. In beiden Fällen handelte es sich um ungefähr gleich mächtige Fein- Mittelsande, deren Korngrößenverteilung und Durchlässigkeitsbeiwerte, die an ungestörten Bodenproben im Labor bestimmt wurden, in den gleichen Größenordnungen lagen.

Tabelle 14 Im Labor bestimmte Durchlässigkeitsbeiwerte orientiert entnommener Proben

Bodenart	k-Wert vertikal (m/s)	k-Wert horizontal (m/s)
Mittelsand	$4.4 \cdot 10^{-5}$	$4.2 \cdot 10^{-4}$
Fein- Mittel- sand	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$1.8 \cdot 10^{-4}$

Nach den Ergebnissen der Durchlässigkeitsbestimmungen ist den Flinzsanden nach der hydrologischen Beurteilung von TERZAGHI u. PECK (1948) ein "mittlerer" bis "geringer", zum Teil auch ein "sehr geringer" Durchlässigkeitsgrad zuzuordnen (Beilage 1 und 2).

Für die tertiären Kiese liegen, da sie nur in geringer Mächtigkeit und praktisch in den Baulosen 4 und 1 auftraten, keine Durchlässigkeitsbestimmungen vor. Der in der Beilage 1 und 2 aufgeführte Wert von $5 \cdot 10^{-4}$ m/s wurde im Labor an

einer gestörten Kiesprobe nach der Methode von KAMENSKY (BOGOMOLOV 1958) bestimmt. DOLLMANN (1967) errechnete aus den Daten der Grundwasserabsenkung des Bauloses 1 für solche Kiese Durchlässigkeiten in der Größenordnung von $2 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

Die Flinzmergel sind in der Regel "praktisch wasserundurchlässig" und höhere Werte für ihre Durchlässigkeit, wie sie sich vereinzelt bei Laborversuchen ergaben, sind durch die schon erwähnte Bröckelstruktur, durch Haarrisse oder durch Klüfte in diesen Sedimenten bedingt (vgl. eingeklammerter Wert in Tabelle 13 bei den Schluffen). Im ungestört anstehenden Mergel sind solche auftretenden Klüfte hydrologisch unwirksam, da sie dicht geschlossen sind. Erst durch künstliche, mechanische Beanspruchungen, wie sie durch die Abbau- und Bohrwerkzeuge oder durch das Fräsrاد des Schildes allerdings bedingt sind, wird der natürliche Verband an diesen vorgegebenen Schwächezonen gelockert und die Klüfte werden dann im engen Bereich der künstlichen Störung wasserwegsam. Für die stark sandigen Schluffe, die in der geologischen Nomenklatur nach v. ENGELHARDT (FÜCHTBAUER 1959) den Staubsanden entsprechen, liegen keine Einzelbestimmungen der Durchlässigkeit vor. Hier sind eventuell etwas höhere Durchlässigkeitsbeiwerte möglich. Sie spielen jedoch für hydrologische Überlegungen keine wesentliche Rolle, da diese stark sandigen Schluffe in der Regel in tonige Schluffe eingebettet sind.

Abschließend sei noch darauf hingewiesen, daß bodenmechanische, geotechnische und hydrologische Kennwerte, wie z. B. die k-Werte, von den Bedingungen der Untersuchungsmethoden abhängig sind und daß sie sich streng genommen nur auf das untersuchte Meßvolumen oder eine bestimmte Meßstrecke beziehen. Dabei wird in der Theorie vorausgesetzt, daß der Untergrund im Untersuchungsbereich homogen ist. Dies ist aber in der Natur nur selten der Fall und gilt insbesondere für die Verhältnisse im Münchner Untergrund nicht. Solche Kennzahlen geben also nur die ungefähre Größenordnung wieder, wie sie allerdings zur Baugrundbeschreibung und zur Beurteilung der allgemeinen Grundwasserverhältnisse und der Maßnahmen der Wasserhaltung ausreichend sind. Für spezielle Probleme sind auch immer spezielle Untersuchungen notwendig. Denn bei der Ermittlung und Auswertung bodenmechanischer, geotechnischer und hydrologischer Kenn-

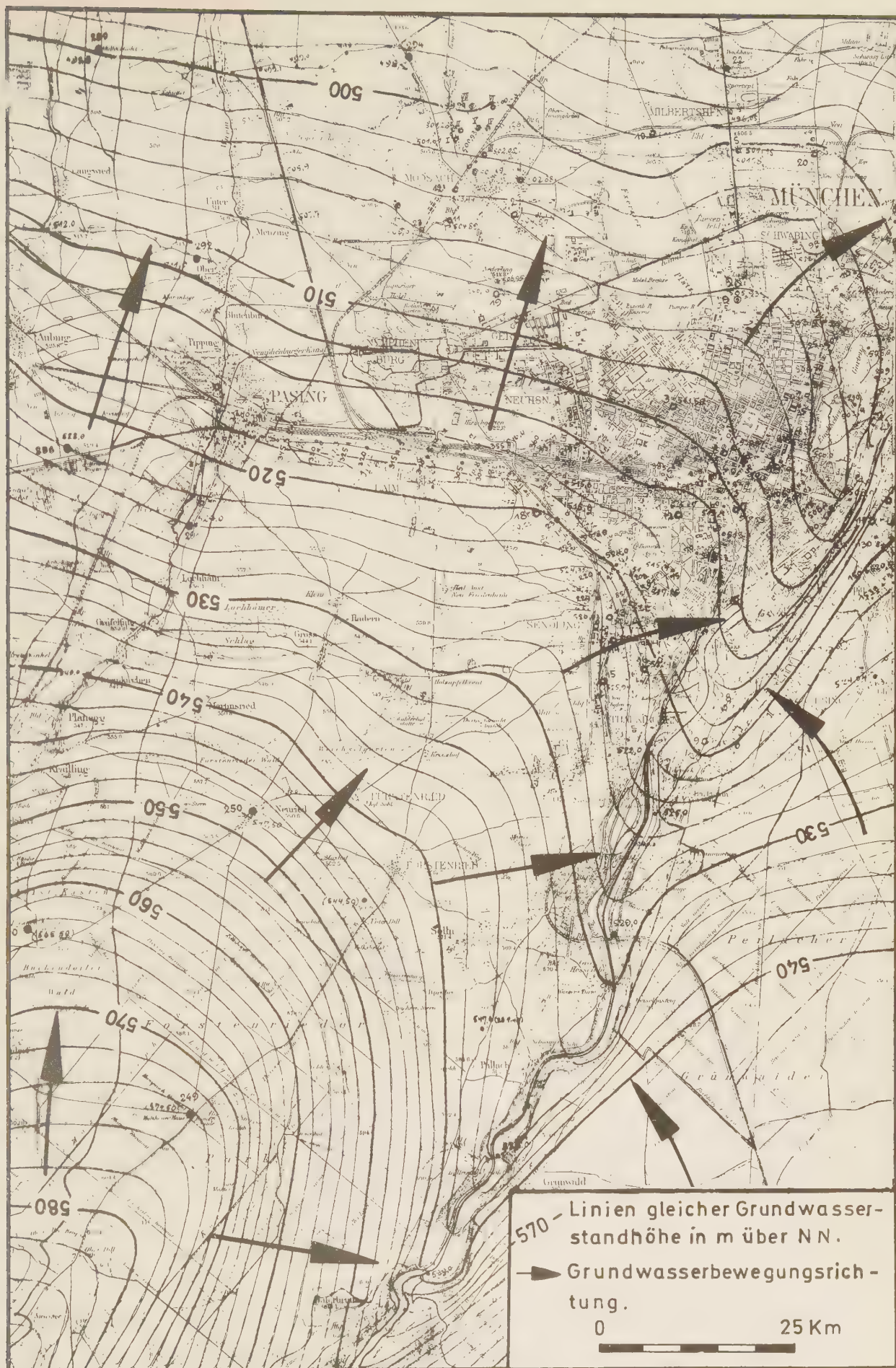
werte muß die Art und die Fehlergrenze der Bestimmungsmethode, die Repräsentativität und die Reproduzierbarkeit der Untersuchungsergebnisse, ebenso wie der gewählte Untersuchungsbereich der Problemstellung entsprechen.

5. Grundwasserhöhengleichen und Grundwasserbewegungsrichtung

Durch Grundwasserhöhengleichen sind in den Tafeln 18, 19 und 20 idealisierte Grundwasseroberflächen des oberen Grundwasserstockwerks für verschiedene Zeitpunkte dargestellt. Die Konstruktion der Grundwasserhöhengleichen erfolgte für bestimmte Teilabschnitte der U-Bahn-Trasse für die Zeit vom 23. 3. 1965 (Tafel 18) oder 22./24. 9. 1965 (Tafeln 19 und 20) vor Beginn der Grundwasserabsenkung des U-Bahn-Baus, für die Zeit vom 23. 9. 1965 (Tafel 18) oder 23./25. 9. 1967 (Tafeln 19 und 20) während der Grundwasserabsenkung des U-Bahn-Baus und für die Zeit vom 23. 9. 1967 (Tafel 18) nach Beendigung der Grundwasserabsenkung des U-Bahn-Baus, soweit sie zur Zeit schon konstruierbar sind. Die Übereinstimmung dieser idealisierten Grundwasseroberflächen mit den natürlichen Grundwasseroberflächen hängt in erster Linie von der Pegeldichte ab. Da die Pegel längs der Trasse und jeweils links und rechts davon im Abstand von ca. 150 m angeordnet sind, kann längs der Trasse nur ein schmaler Ausschnitt von etwa 300 m dargestellt werden. Im nördlichen Teil der Trasse ab Bahnhof Studentenstadt wurden nur vereinzelte Pegel abgeteuft, da hier die U-Bahn-Trasse über Gelände liegt (Beilage 1, I).

Allgemein gilt, daß die Konstruktion der Grundwasseroberfläche für Zeiten von HW und NW, die vom hydrologischen Standpunkt aus am interessantesten wären, nicht möglich waren, da im Winter 1965 noch nicht genügend Pegel längs der U-Bahn-Trasse vorhanden waren und im Sommer 1965 die Grundwasserabsenkung im Baulos 1 und 2 bereits begonnen hatte, während im südlichen Teil der U-Bahn-Trasse die Grundwassermeßstellen erst eingerichtet wurden. Es existieren also praktisch keine mehrjährigen oder wenigstens einjährigen Grundwasserstandsbeobachtungen längs der U-Bahn-Trasse in ausreichender Dichte, aus denen sich die Werte für HW und NW ermitteln ließen.

Da im Bereich des Münchner Untergrundes das Relief der Grundwassersohlen (Flinzmergel) unruhig und die Grundwassersohlen in ihren Höhenlagen unterschiedlich sind, ergeben sich für den unbeeinflussten Zustand im Grundwasser oft



Tafel 17 Grundwasserhöhengleichen für den Grundwasserhochstand 1939 (nach einer Darstellung der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde). Die Pfeile geben die Grundwasserbewegungsrichtung an; die Grundwasserhöhengleichen sind in Meter über NN dargestellt.

inselartige Aufragungen der Grundwasserstauer (Tafeln 18, 19 und 20). Zum Teil schirmen oder decken auch Flinzmergelschichten das obere Grundwasserstockwerk ab. Es kommt zuweilen vor, daß bei der relativ weitmaschigen Anordnung der Pegel diese Höhenlagen des Flinzmergels nicht erkannt werden und die Grundwasserhöhengleichen auch in solchen Bereichen theoretisch durchgezogen sind. Auch Beeinflussungen der bis ins Grundwasser reichenden Tiefbauten oder kleinerer Entnahmetrichter werden nicht erfaßt. Die Grundwasserdruckflächen tieferer Stockwerke sind nur an wenigen Stellen konstruierbar (Tafel 19). Selbstverständlich sind bei der Konstruktion von Grundwasserhöhengleichen nur die Wasserstände des jeweiligen Grundwasserstockwerks zu verwenden.

Die großräumigen Verhältnisse zeigt die Tafel 17. Hier sind die Grundwasserhöhengleichen für den Hochstand des Jahres 1939 gezeichnet. Dieser Ausschnitt, nach einer Darstellung der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde, München, gibt eine gute Annäherung für die Grundwasserbewegungsrichtung des oberen Grundwasserstockwerkes in der Schotterebene westlich und südlich von München und im Stadtgebiet. Die Bewegungsrichtung des Grundwassers in der Schotterebene geht im allgemeinen von Süd nach Nord, oder von Südsüdwest nach Nordnordost. Diese Richtung ändert sich bei der Annäherung an die Isar. Hier strömt das Grundwasser links der Isar in Südwest-Nordost- oder in Westsüdwest-Ostnordost-Richtung, in Teilgebieten auch in West-Ost-Richtung. Rechts der Isar ist die Grundwasserbewegungsrichtung Südost-Nordwest, sie wird mit Annäherung an die Isar Ostsüdost-Westnordwest.

Der Abstand der Grundwasseroberfläche von der Geländeoberkante (Flurabstand) ist in der Innenstadt in den letzten Jahren und auch im Hochwasserjahr 1965 bei Hochständen immer noch wesentlich größer als der, den man aus dem in der Tafel 17 dargestellten Grundwasserstand von 1939 ermitteln kann. Auch der von TILLMANN (1953) in seiner geologisch-hydrologischen Karte von München (1 : 50 000) konstruierte Flurabstand für MW ist zur Zeit im Stadtgebiet nicht erreicht.

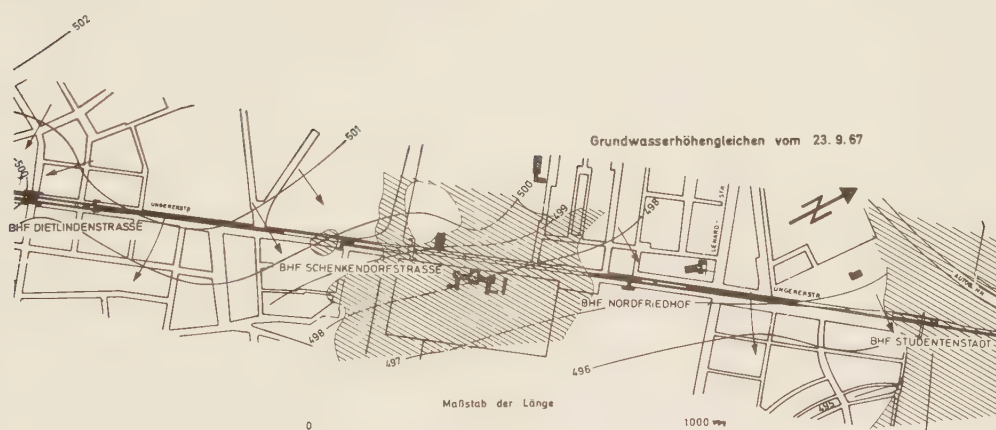
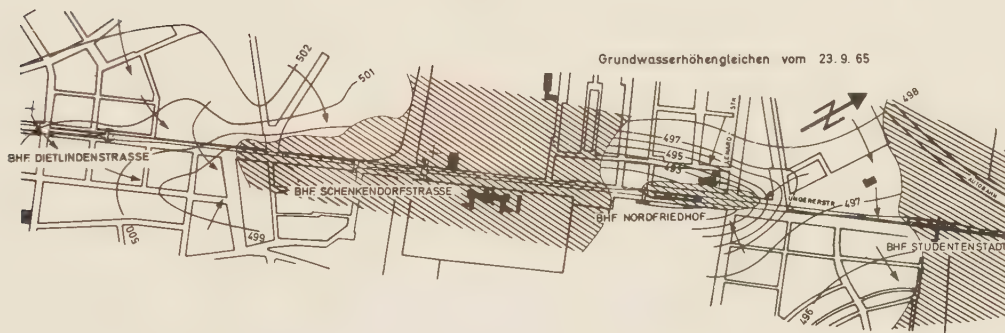
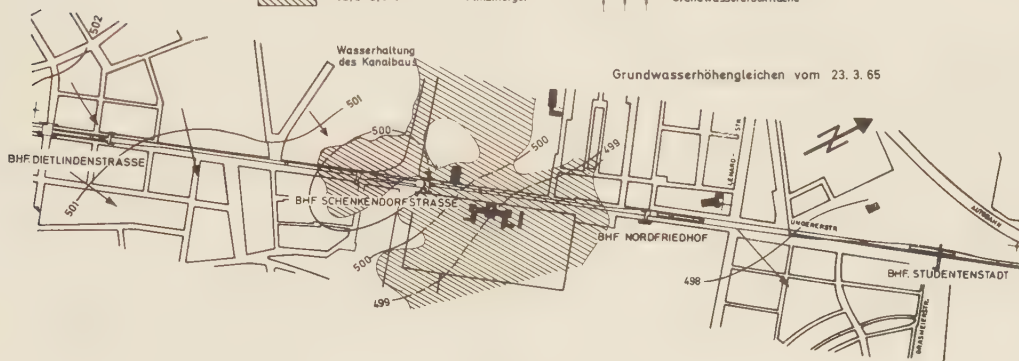
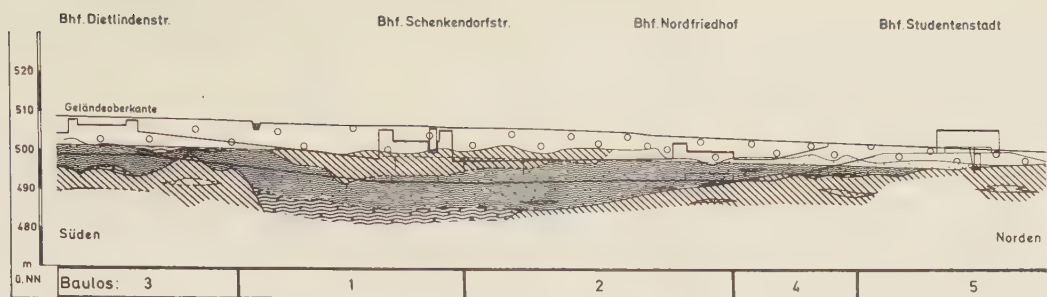
Das Grundwassergefälle im oberen Grundwasserstockwerk liegt im allgemeinen bei rund 3 ‰, im einzelnen ergeben sich Werte zwischen 2 und 8 ‰. Das Grundwassergefälle wird aus den Grundwasserständen von Beobachtungspegeln fest-

gestellt. Da die Abstände dieser Pegel in der Regel groß sind (ca. 100 m), handelt es sich bei der Angabe von Grundwassergefälle nur um relativ grobe Näherungswerte. Durch Inhomogenitäten im Grundwasserleiter, die durch unterschiedliche Körnung, Durchlässigkeit oder Gefüge bedingt sein können, treten örtlich in kleinen Bereichen erhebliche Abweichungen auf. In den Tertiärsanden ergeben sich in der Regel Grundwassergefälle zwischen 4 und 8 ‰, in den quartären Schottern zwischen 2 und 5 ‰.

Die großmaßstäblichen Darstellungen der Tafeln 18, 19 und 20 zeigen, daß bei unbeeinflussten Zuständen (23.3.1965 und 22./24.9.1965) die wesentlichen Änderungen der Grundwasserbewegungsrichtung im Bereich der Terrassenkante Altstadtstufe/Isaralluvium eintreten. Vor der Aufschüttung des Alluviums, auf dem heute der Englische Garten und die Isarauen liegen, haben sich die Vorläufer der heutigen Isar bis in den tertiären Untergrund eingeschnitten, so daß auch in dem Tiefenlinienplan der Tertiäroberfläche (Beilage 1, III) diese ehemalige Erosionsterrassenkante mehr oder weniger erkennbar ist. Wie schon erwähnt, tiefte sich in historischer Zeit die Isar erneut in das Tertiär ein, so daß nun durch die Verbauung des Flußufers der Abfluß des Grundwassers im Isaralluvium (z.B. Englischer Garten) gebietsweise behindert wird.

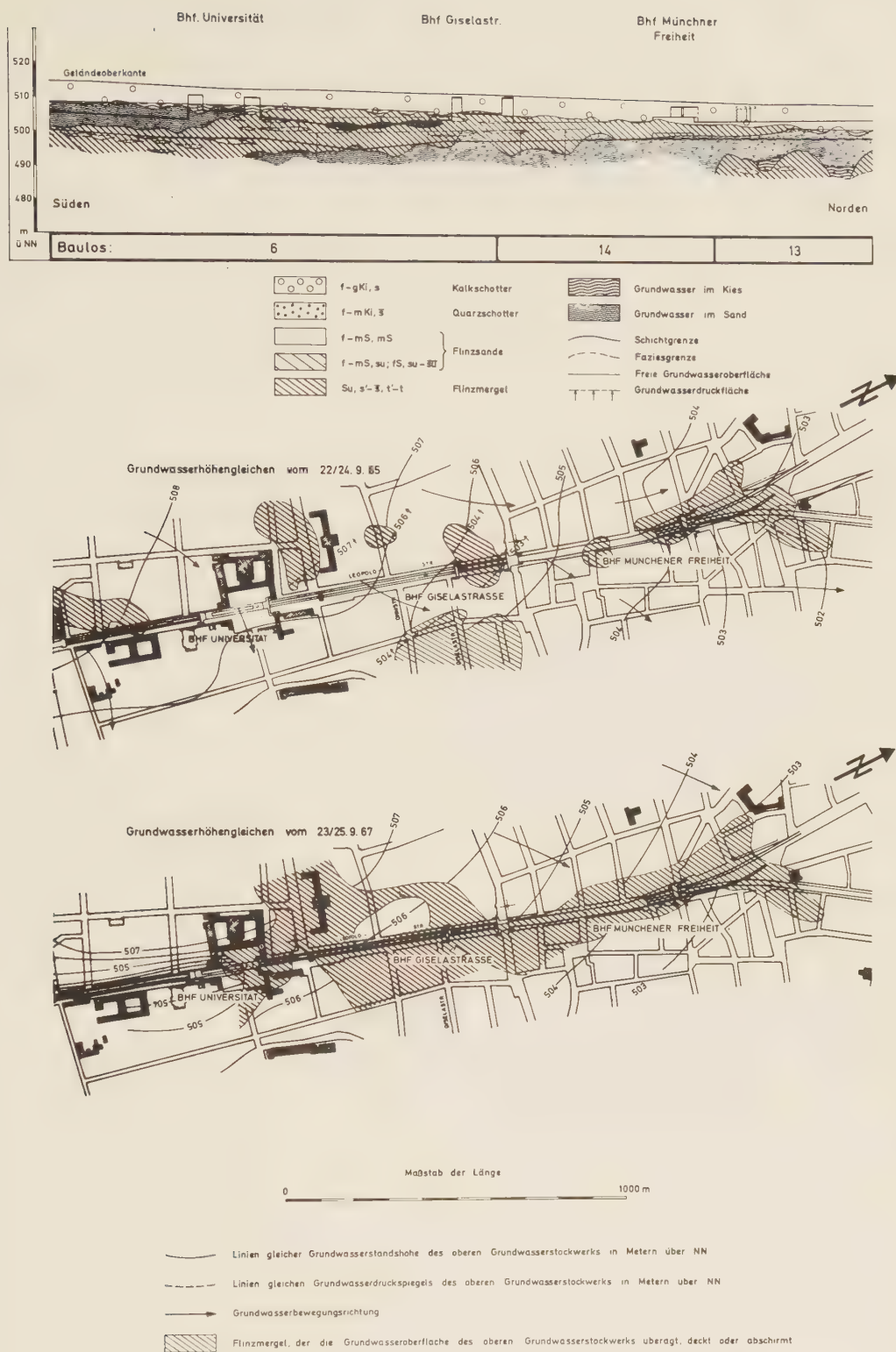
Im nördlichen Teil der Trasse (Tafel 18) zwischen Bahnhof Dietlindenstraße und Bahnhof Studentenstadt ist ein ungestörter Zustand vor Beginn der Baumaßnahmen des U-Bahn-Baues nicht konstruierbar, da sich bei dem dargestellten Zustand vom 23.3.1965 die Wasserhaltung bei den Bauarbeiten zur Verlegung des Hauptkanals in der Schenkendorf-/Ungererstraße auswirkt.

Bei der Betrachtung der Grundwasserhöhengleichen ist zu beachten, daß das obere Grundwasserstockwerk durch den in der Ludwig-, Leopold- und Ungererstraße verlaufenden Hauptkanal der Stadtentwässerung beeinflusst wird. Der Kanal bindet in der Regel in den tertiären Untergrund ein und überragt zumindest gebietsweise die Grundwasseroberfläche des oberen Grundwasserstockwerks. Je nach den örtlichen bautechnischen Gegebenheiten kann der Kanal gebietsweise unterschiedlich als Staukörper oder als Drainage wirken. Eine Stauwirkung kann nur dort eintreten, wo der Kanal in den schwer- oder undurchlässigen Flinzmergel einbindet, denn über die Tertiärsande, die zum oberen Grundwasserstockwerk gehören, erfolgt der Druckausgleich im Grundwasser nach dem Prinzip der



- 500 — Linien gleicher Grundwasserstandshöhe des oberen Grundwasserstockwerks in Metern über NN
- 500 - - - Linien gleichen Grundwasserdruckpiegels des oberen Grundwasserstockwerks in Metern über NN
- Grundwasserbewegungsrichtung
- Flinzmergel, der die Grundwasseroberfläche des oberen Grundwasserstockwerks überagt, deckt oder abschirmt
- Bauwerk überagt die freie Grundwasseroberfläche

Tafel 18 Hydrogeologisches Profil und Grundwasserhöhengleichen längs der Nord-Süd-Trasse
Baulose 3, 1, 2 und 4



Tafel 19 Hydrogeologisches Profil und Grundwasserhöhengleichen längs der Nord-Süd-Trasse:
Baulose 6, 13 und 14



Tafel 20 Hydrogeologisches Profil und Grundwasserhöhengleichen längs der Nord-Süd-Trasse:
Baulose 18, 17, 9, 15 und 7

kommunizierenden Röhren. Die Stauwirkung ist nach den bisherigen Erfahrungen gering und in den beobachteten Grundwasserpegeln nicht nachweisbar. Auch eine Drainagewirkung des Kiesbettes des Kanals ist nur zu vermuten. Die Auswirkungen des Kanals wurden daher in den Grundwasserhöhengleichendarstellungen wegen der weitmaschigen Pegelanordnung im allgemeinen nicht erfaßt.

In den Darstellungen der Zustände während der Grundwasserabsenkung des U-Bahn-Baus (Tafeln 18, 19 und 20; 23.9.1965 und 23./24.0.1967) entstehen nur dort erfaßbare Entnahmetrichter, wo die durchlässigen Schichten (Kies, Sand) in einer relativ großen Mächtigkeit anstehen. In Bereichen, in denen die Grundwassermächtigkeit des oberen Grundwasserstockwerks dagegen gering ist, fallen in der Konstruktion weite Bereiche der Grundwassersohle nach Beginn der Grundwasserabsenkung trocken, ohne daß die eigentlichen Entnahmetrichter um die Brunnengalerien konstruierbar sind (Tafel 19; vgl. IV, 4.2).

Auch bei der Konstruktion der Zustände während der Grundwasserabsenkung wird bei den mächtigeren Grundwasserleitern nicht jeder einzelne Detail-Entnahmetrichter um die Brunnengalerien erfaßt (Tafel 20). In den Darstellungen (Tafeln 18, 19 und 20) zeigt der Vergleich zwischen hydrogeologischem Profil und den Grundwasserhöhengleichungen, daß die in den quartären Schottern ausgebildeten Entnahmetrichter in Abhängigkeit von der Grundwassermächtigkeit in der Regel wesentlich flacher und weitreichender sind als die steilen Entnahmetrichter in den tertiären Sanden mit freier Grundwasseroberfläche.

Ein Zustand nach Beendigung der Grundwasserabsenkung des U-Bahn-Baues ist nur in der Tafel 18 (23.9.1967) für den nördlichen Teil der Trasse zwischen Bahnhof Dietlindenstraße und Bahnhof Studentenstadt dargestellt. Auf den Einfluß des fertiggestellten Baukörpers auf die Grundwasserströmung wird in Abschnitt IV, 5 noch eingegangen.

6. Lokale Fließrichtung des Grundwassers

6.1 Untersuchungsmethode

Als lokale Fließrichtung ist die in einem Pegel zu einem bestimmten Zeitpunkt und in einem bestimmten Niveau festgestellte Fließrichtung des den Pegel durchströmenden Grundwassers zu verstehen.

Nach der Methode MOSER, NEUMAIER u. RAUERT (1967) ist diese Fließrichtung in einem einzigen Pegel feststellbar. Das Wasser im Filterrohr wird mit ^{198}Au radioaktiv markiert und der Austritt des Tracers mit einer Richtungssonde (kollimierte Szintillationszähler) beobachtet. Mit Packeranordnungen kann das Meßprofil im Pegel in 0.5 m lange Untersuchungsabschnitte aufgeteilt werden.

Auch hier ist die wichtigste Voraussetzung für eine einwandfreie Messung eine gleichmäßige, freie Durchlässigkeit des Filters. Verockerung, ungleichmäßige Kiesschüttungen, aber auch Inhomogenitäten im Grundwasserleiter im näheren Bereich des Pegels können zu erheblichen Richtungsabweichungen führen. Bei Sandeintrieb im Pegel wird das verwendete ^{198}Au zum Teil an diesen Sandteilchen adsorbiert. Es schwebt dann im Pegel, anstatt in den Grundwasserleiter abzuwandern.

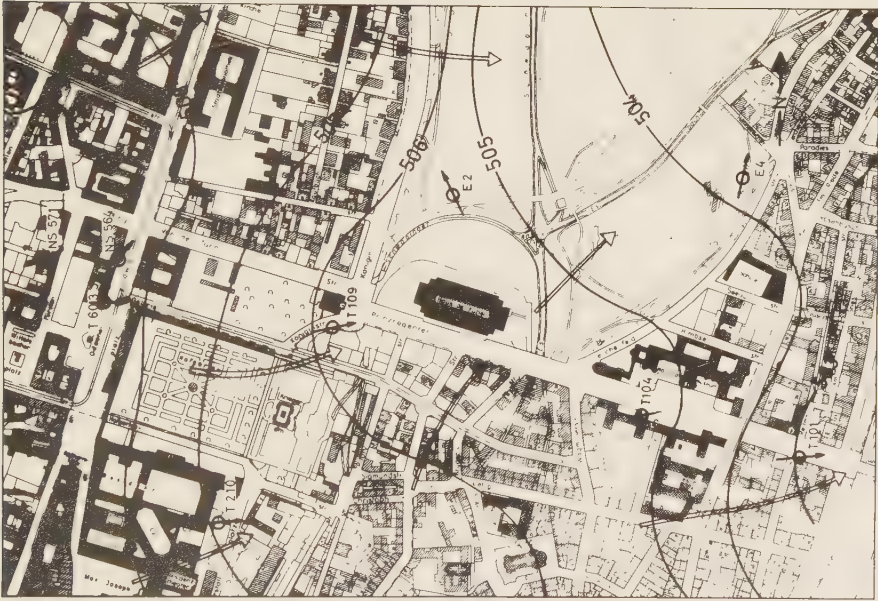
6.2 Untersuchungsergebnisse

Im Rahmen der hydrogeologischen Voruntersuchungen des U-Bahn-Referats wurde die lokale Fließrichtung durch das Forschungsinstitut für Radiohydro-metrie, München, in einer Anzahl von Pegeln bestimmt. Bei der Auswertung wurden auch Ergebnisse berücksichtigt, die im Auftrag der Bayerischen Landes-stelle für Gewässerkunde, München, im Englischen Garten in München gewonnen wurden.

Die bisherigen Untersuchungen haben folgendes gezeigt: die lokalen Fließrichtungen entsprechen, wenn der Meßpunkt im oberen Grundwasserstockwerk und im Bereich des quartären Kieselies liegt, im allgemeinen den Grundwasserbewegungs-richtungen, die sich aus der Hydroisohypsenkarte ergeben (Tafel 21: T 101, T 210, T 109, T 603, E 4).

Erhebliche Abweichungen sind durch im Grundwasser liegende Tiefbauten, Absenktrichter oder durch Unregelmäßigkeiten der Tertiäroberfläche (Flinzre-lief) bedingt (Tafel 16: NS 571, E 2).

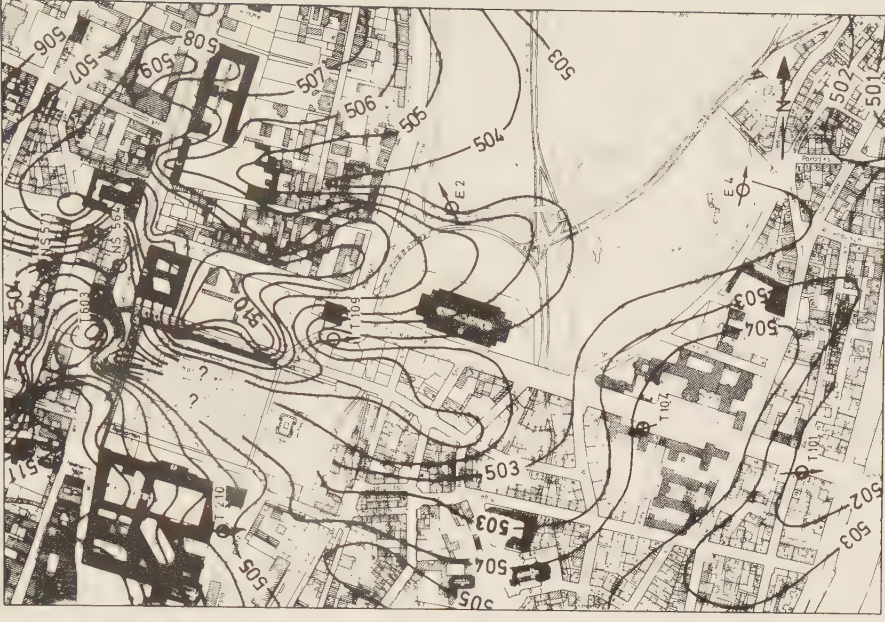
Setzt sich ein Grundwasserstockwerk aus zwei verschiedenen Grundwasserleitern (Quartärkies, Tertiärsand) zusammen, so können sich die lokalen Fließrichtungen in den einzelnen Grundwasserleitern voneinander unterscheiden, sie müssen es aber nicht (Tafel 16: E 2). In solchen Fällen ist für die Richtungsabweichung



—503— Grundwasserhöhengleichen
in Meter über NN
vom 11.9. – 21.9.66

→ Grundwasserbewegungs-
richtung

Tafel 21 Fig. a: Vergleich der Grundwasserbewegungsrichtung
(= Normale auf die Grundwasserhöhengleichen)
mit, in Pegeln gemessenen, lokalen Fließ-
richtungen



—503— Tiefenlinien der Tertiär-
oberfläche in Meter
über NN

→ Lokale Fließrichtung
im Pegel

Fig. b: Tiefenlinienplan der Tertiäroberfläche und
Darstellung der, in Pegeln gemessenen,
lokalen Fließrichtungen

meist die Dränwirkung in der Nähe liegender "Rinnen" verantwortlich. Die lokale Fließrichtung des Grundwassers kann sich mit der Zeit ändern. In verschiedenen Tiefen des Grundwasserleiters kann die lokale Fließrichtung verschieden sein. Die Grundwasserstände scheinen nur einen geringen Einfluß auf die lokale Fließrichtung zu haben.

Die Fließrichtungen in tieferen Grundwasserstockwerken unterscheiden sich erheblich von denen des oberen Stockwerkes: sie sind nicht selten fast entgegengesetzt gerichtet. Die tieferen Grundwasserstockwerke führen nämlich in der Regel gespanntes Wasser: Absenkungen in den tieferen Stockwerken haben daher meist eine große Reichweite und durch Absenkungen wird vielfach die normale Grundwasserströmung über größere Bereiche als in den oberen Grundwasserstockwerken beeinflusst (Tafel 16: Fig. A). Daneben besitzen die tieferen Grundwasserstockwerke vielfach ein anderes Einzugsgebiet und einen anderen Vorfluter als das obere Grundwasserstockwerk, was wiederum die Richtungsunterschiede zwischen dem oberen und den unteren Grundwasserstockwerken erklärt (Tafel 16: Fig. B).

7. Grundwasserchemismus

Der Chemismus stellt eine charakteristische Eigenschaft des Grundwassers dar und gibt Auskunft über die Herkunft des Grundwassers aus bestimmten Speichergesteinen und über Verunreinigungen, die das Grundwasser im Laufe der Zeit erfährt. Er ist zeitlichen und örtlichen Schwankungen unterworfen. Die chemische Beschaffenheit des Grundwassers hängt von einer Reihe von Faktoren ab, wie z.B. von der Menge und der Sickergeschwindigkeit der Niederschläge, von der Pflanzendecke, von den durchsickerten Bodenschichten, von der petrographischen Ausbildung des Grundwasserleiters und vor allem von künstlichen Einflüssen, wie Düngung, Überbauung, Einleitung oder Zusickeung von Ab- und Brauchwasser u. a. .

GERB (1958) konnte aus der Vielzahl der natürlichen Wässer verschiedene "Grundwassertypen" im chemischen Sinne ausscheiden. "Von einem Grundwassertyp wird dann gesprochen, wenn sich zwischen den Eigenschaften chemisch gleichartiger Wässer und denen des geologischen Körpers, aus dem sie stammen, eine eindeutige Zuordnung herstellen läßt" (GERB 1958).

Aus diesem Grund wurden die Untersuchungsergebnisse in Tabelle 16 und Tafel 22 nach den Grundwasserleitern und den Grundwasserstockwerken, aus denen die Wasserproben entnommen wurden, geordnet. Die Daten stammen aus Analysen der Staatlichen Chemischen Untersuchungsanstalt, München, des Landesamtes für Wasserversorgung und Gewässerschutz, München, und der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde, München, sowie aus eigenen Wasseranalysen des Verfassers.

7.1 Einführung in den Stoffbestand des Grundwassers

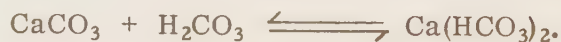
Zum besseren Verständnis der nachfolgenden Untersuchungsergebnisse werden kurz die wichtigsten chemischen Charakteristika des Grundwassers erläutert.

Die Härte des Wassers ist durch den Gehalt an Erdalkaliverbindungen bedingt; sie wird in Deutschen Härtegraden angegeben.

Die Karbonathärte errechnet sich, wie die gebundene Kohlensäure, aus dem Säurebindevermögen, auch Alkalität oder m-Wert genannt. Sie entsteht im allgemeinen durch die Karbonate des Kalziums und des Magnesiums. Wenn vorhanden, so gehen in diesen Wert auch die Hydrogenkarbonate des Natriums, Kaliums und Eisens ein. In einem solchen Fall kann dann die Karbonathärte die Gesamthärte übersteigen, während es im Normalfall umgekehrt ist. Diese "scheinbare" Karbonathärte stellt dann nur einen Rechnungswert dar. Die Karbonathärte wird dann gleich der Gesamthärte gesetzt.

Die Gesamthärte wird unabhängig von der Karbonathärte als die Summe der gelösten Magnesium-, Kalzium- und Kohlensäureverbindungen bestimmt. Die Differenz dieser beiden Härten ist die "Bleibende Härte", auch "Nichtkarbonat-" oder "Resthärte" genannt. Sie ist bedingt durch die Kalzium- und Magnesiumgehalte, die den Nichtkarbonatsalzen, wie Sulfat, Chlorid und Nitrat, entsprechen.

Unter der Freien Kohlensäure ist diejenige Kohlensäuremenge zu verstehen, die im Grundwasser gelöst und nicht an Salze gebunden ist. Ein beträchtlicher Teil davon wird als freie zugehörige Kohlensäure zur Aufrechterhaltung der Hydrogenkarbonatverbindungen gebraucht:



Die darüber hinausgehende sogenannte aggressive (freie) Kohlensäure ist kalklösend und betonangreifend. Die Kohlensäure stammt im Regelfall zu einem Teil aus der Atmosphäre (Regenwasser), zum anderen, meist überwiegenden Teil aus der belebten oberen Bodenzone (Pflanzenbewuchs), in der das Sickerwasser aus der CO₂-reichen Bodenluft erhebliche Mengen an freiem Kohlendioxyd aufnehmen kann.

Das Chlorid tritt im Grundwasser als gelöstes Natriumchlorid auf. Auch Chloridverbindungen des Kalziums und des Magnesiums können im Wasser auftreten, sie lassen, wie schon erwähnt, die Nichtkarbonathärte erheblich ansteigen.

Hohe Chloridgehalte ($> 40 \text{ mg/l}$) im Grundwasser weisen, wenn sie nicht auf marine Residualwässer, vulkanische Beeinflussungen oder Salzlager im Grundwasserleiter zurückgeführt werden können, auf Abwässereinflüsse oder Düngung im Einzugsgebiet hin.

Das Sulfat ist vorwiegend als Kalzium- und Magnesiumsulfat im Wasser gelöst. Für erhöhte Sulfatgehalte ($> 60 \text{ mg/l}$) gilt dasselbe wie oben. Sie sind ein deutlicher Hinweis auf Abwässereinflüsse, wie z.B. auf Haus- und bestimmte Industrieabwässer. Sehr hohe Sulfatgehalte ($> 200 \text{ mg/l}$) gelten als betonschädlich.

Der Stickstoff liegt im Grundwasser normalerweise in seiner höchsten Oxydationsstufe als Nitrat vor. Hohe Nitratwerte ($> 35 \text{ mg/l}$) und vor allem Auftreten von Ammoniak und Nitrit weisen auf Einflüsse von organischen Zersetzungsprodukten oder Düngung hin, sofern im Einzugsgebiet nicht Torf oder Braunkohle vorkommen.

Der Kaliumpermanganatverbrauch ist ein Maß für den Gehalt an organischen Stoffen.

Der freie Sauerstoff ist korrosionstechnisch in der Wasserwirtschaft von Bedeutung. Fehlt der freie Sauerstoff, so wirken die Wässer metallaggressiv. Von dem Gehalt an freiem Sauerstoff hängt das Nichtvorhandensein verschiedener anderer Ionen, wie Ammonium, Nitrit, zweiwertiges Eisen oder zweiwertiges Mangan ab. Der größte Teil des im Wasser gelösten freien Sauerstoffs wird während der Kondensation der Niederschläge aus der Luft aufgenommen. GERB unterschied nach dem Sauerstoffgehalt und den Gehalten der davon abhängigen Ionen zwischen einem sauerstoffhaltigen ($4\text{--}8 \text{ mg/l}$) bis sauerstoffreichen ($> 8 \text{ mg/l}$) Normaltyp und einem sauerstofffreien bis sauerstoffarmen ($< 2 \text{ mg/l}$) Reduktionstyp. Das Fehlen oder die Armut an freiem Sauerstoff im Grundwasser ist durch Reduktionszonen im Einzugsgebiet bedingt, tritt aber auch bei Tiefenwässern auf.

Der Abdampfrückstand gibt eine summarische Aussage über die gesamten, gelösten Stoffe im Grundwasser: er schwankt in der Regel bei natürlichen Wässern zwischen 200 und 600 mg/l . Liegt er höher als 1000 mg/l , so spricht man bereits von Mineralwässern.

Die Leitfähigkeit ist ein Maß für den Elektrolytgehalt der Grundwässer. Je höher sie ist, desto höher ist der Gehalt an gelösten Salzen. Die Leitfähigkeit ist der reziproke Wert des Ohmschen Widerstandes und wird in Mikrosiemens pro Zentimeter ($\mu\text{S/cm}$) gemessen.

7.2 Untersuchungsergebnisse

Die Tabelle 16 gibt die Ergebnisse von 30 Analysen wieder. Die Extremgehalte der einzelnen Ionen sind, nach zueinander gehörenden oder voneinander abhängigen Gruppierungen geordnet, in der Tabelle 17 angegeben. Um eine objektive Beurteilung zu ermöglichen, ist bei den Extremgehalten in der Tabelle 17 jeweils die Anzahl der zugrundeliegenden Analysenwerte eingetragen. Einen Überblick über die verschiedenen Härten geben die Härtedreiecke der Tafel 22, in

denen die Gesamthärte (GH), die Karbonathärte (KH) und die Nichtkarbonathärte (NKH) einer Grundwasserprobe jeweils durch einen Punkt in einem gleichseitigen Dreieck wiedergegeben werden. Die Dreiecksdarstellung der Härtewerte der Wässer aus den einzelnen Grundwasserstockwerken wurden noch zusätzlich mit rechtwinkligen Systemen kombiniert, in denen, soweit wie möglich, die Abhängigkeit des Chlorid- und Nitratgehaltes von der Gesamthärte und die des Sulfatgehaltes von der Nichtkarbonathärte dargestellt wurden.

Als Grundwasserleiter treten im Stadtgebiet Kalkschotter des Quartärs und glimmerreiche Quarzsande des Jungtertiärs (Obere Süßwassermolasse) auf. GERB (1958) schied für die Münchner Schotterebene den Grundwassertyp der "Kalkschotterwässer" und für die Gebiete der Oberen Süßwassermolasse den Typ der "Tertiärwässer" aus. Die beiden Grundwassertypen sind in der Tabelle 15 charakterisiert.

7.21 Obere Grundwasserstockwerke

Nach den Tabellen 16 und 17 haben die Grundwässer des oberen Grundwasserstockwerks (Kalkschotterwässer) folgende Charakteristik:

Alkalische, "ziemlich harte" bis "harte", meist sauerstoffhaltige bis sauerstoffreiche Kohlensäuregleichgewichtswässer;

p_H-Werte zwischen 7.1 und 7.6 mit stark wechselnden Gehalten von Chlorid, Nitrat und Sulfat;

Kieselsäuregehalt bis 7 mg/l;

Nichtkarbonathärte schwankt in weiten Grenzen in Abhängigkeit von den Chlorid-, Nitrat- und Sulfatgehalten zwischen 0.0 und 13.7° dNKH.

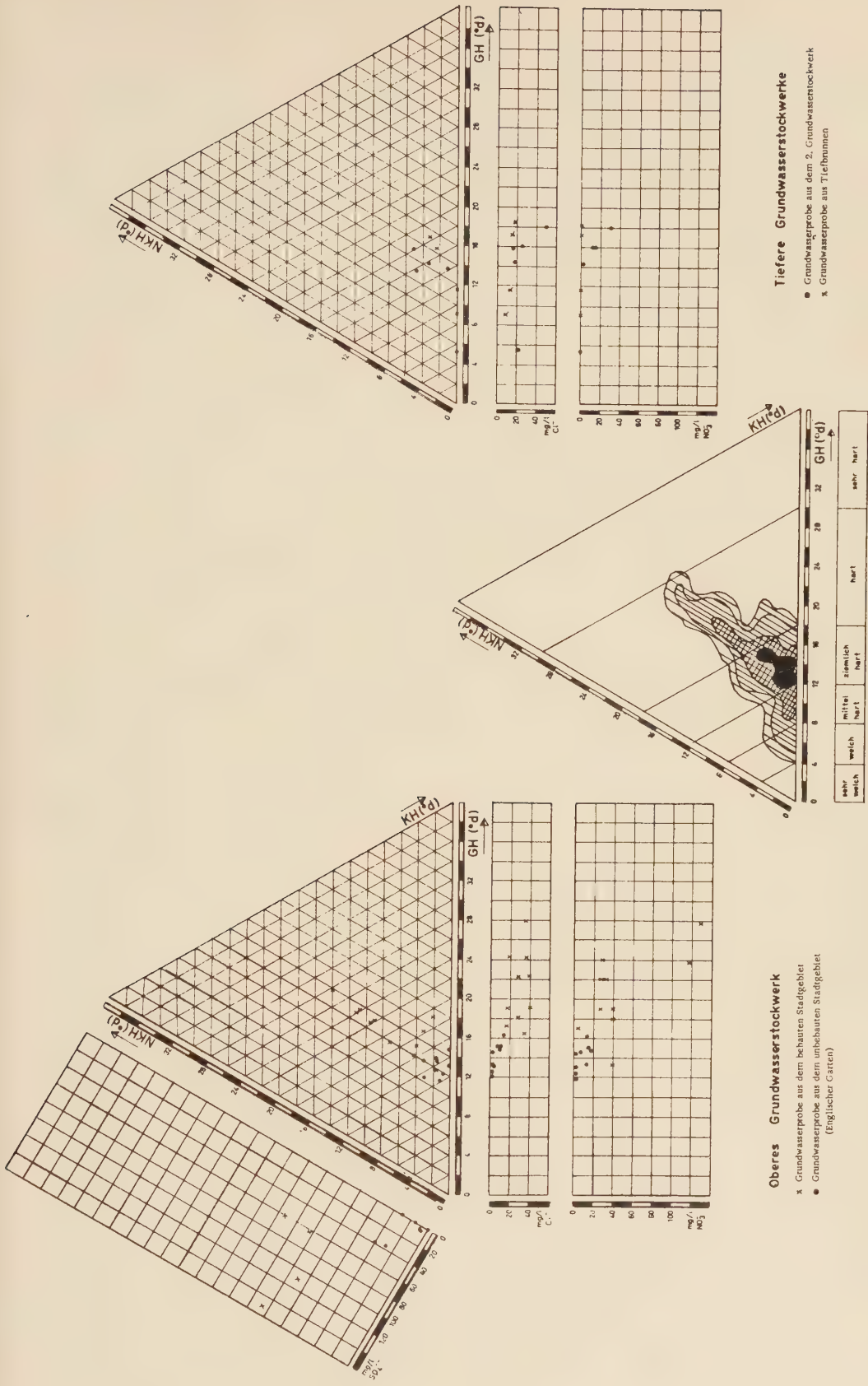
Bezeichnend ist der relativ hohe Magnesiumanteil an der Gesamthärte (25 bis 45 %).

Neben dem Normaltyp (sauerstoffhaltig bis sauerstoffreich) treten auch, allerdings selten, "reduzierte" Wässer auf (sauerstofffrei bis sauerstoffarm).

Diese Kalkschotterwässer sind, wie oben gesagt, Kohlensäuregleichgewichtswässer. Ein Kalkkohlenäuregleichgewicht liegt dann vor, wenn in der Gleichung



weder eine Reaktion von links nach rechts (Kalklösung) noch in umgekehrter Richtung (Kalkfällung) stattfindet. Die im Gleichgewicht noch vorhandene, nach



Tafel 22 Darstellung der Härtewerte von 30 Grundwasseranalysen aus dem Münchner Raum in Härtereichen. Zugleich wurde versucht, die Abhängigkeit der Chlorid- und Nitratgehalte von der Gesamthärte (GH) und der Sulfatgehalte von der Nichtkarbonathärte (NKH) in rechtwinkligen Systemen aufzuzeigen.

Tabelle 15 Chemische Charakterisierung der Grundwassertypen
"Kalkschotterwässer" und "Tertiärwässer" nach
GERB (1958)

<u>Kalkschotterwässer</u>		
Abdampfrückstand etwa 350 ± 50 mg/l		
Karbonathärte etwa 16 ± 3^0 d		
Gesamthärte = Karbonathärte plus 1 bis 3^0 d		
Magnesiumanteil der Gesamthärte etwa 30 bis 35 %		
freie Kohlensäure gleich der zugehörigen (Gleichgewichtswässer)		
Chlor-Ion) immer vorhanden, jedoch nur in kleinen Konzentrationen		
Sulfat-Ion)		
$p_H = 7.3 \pm 0.2$		
Nitrat-Ion	<u>Normaltyp</u> fast immer, aber nur in kleinen Konzentra- tionen vorhanden	<u>Reduktionstyp</u> gewöhnlich nur in Spuren vor- handen, oder fehlt völlig
freier gelöster Sauerstoff	6 bis 9 mg/l	häufig unter 1 mg/l oder fehlt ganz
Ammonium-Ion	fehlt	oft vorhanden
Nitrit-Ion	fehlt	oft vorhanden
Hydrosulfid-Ion	fehlt	oft vorhanden
Eisen(II)-Ion	fehlt	oft vorhanden
Mangan(II)-Ion	fehlt	oft vorhanden
Permanganatverbrauch	2 bis 4 mg/l	2 bis 8 mg/l, in einzelnen Fällen mehr
<u>Tertiärwässer</u>		
Abdampfrückstand $200 \pm$ etwa 50 mg/l und darunter		
Karbonathärte $9 \pm$ etwa 2^0 d		
Gesamthärte = Karbonathärte + etwa 1^0 d		
Magnesiumanteil der Gesamthärte zwischen 25 und 50 %, überwiegend jedoch über 35 und häufig über 40 %		
freie Kohlensäure höher als die nach Bodländer-Tillmans zugehörige: kalkaggressive, nicht zur Schuttbildung befähigte Wässer		
Chlorid-, Sulfat- und Nitrat-Ion immer nur in untergeordneten Konzentrationen vorhanden		
Kieselsäuregehalt 8 bis 15 mg SiO_2 mg/l		

Tabelle 16 Chemische Analysen von Grundwasserproben aus dem Bereich der U-Bahn-Trassen, München

Bez.	Datum	Ca mg/l	Mg mg/l	CO ₂				Cl ⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	SO ₄ ⁻⁻ mg/l	SiO ₂ mg/l	KMnO ₄ ⁻ Verbrauch mg/l	NH ₄ mg/l	Fe (gesamt) mg/l	Gesamt-Karbonat Härte		pH
				frei	geb.	zugeh. (Tab.)	aggr. (M-Vers.)								o _d	o _d	

1. Grundwasserproben aus dem Quartäries (Oberes Grundwasserstockwerk)

E 2	27.4.67	75.5	24.7	nu	94.6	20.5	nu	14.2	14	38	4.8	3.5	nu	nn	16.2	12.0	nu
E 5	27.4.67	54.3	18.6	nu	86.9	15.3	nu	1.7	3	4	6.3	6.9	nu	+	11.9	10.8	nu
E 6	27.4.67	66.5	23.4	nu	116.6	42.3	nu	3.0	2	nn	6.4	4.1	nu	+	14.7	14.7	nu
E 7	27.4.67	61.5	16.5	nu	92.4	18.9	nu	3.0	3	5	5.7	6.3	nu	nn	12.4	11.8	nu
E 8	27.4.67	96.4	20.3	nu	123.2	51.0	nu	10.6	18	nn	4.2	7.3	nu	nn	14.5	12.9	nu
E 10	27.4.67	69.3	14.7	nu	94.6	20.5	nu	3.0	3	19	2.9	6.9	nu	nn	13.1	13.1	nu
NS 699	17.4.67	nu	nu	nu	118.8	45.0	nu	48.0	40	+	2.5	4.2	3	+	17.9	15.1	7.5
OS 30(0)	17.4.67	nu	nu	nu	92.4	18.9	nu	54.0	40	+	6.0	nu	nn	0.10	13.4	11.8	7.6
OS 18	18.4.67	nu	nn	18.2	92.4	18.9	nu	60.0	40	++	5.0	nu	nn	0.20	19.0	11.8	7.4
NS 669	18.4.67	nu	nu	30.0	105.6	30.0	nu	53.0	32	++	5.0	nu	nn	0.33	22.0	13.4	7.5
OS 134	18.4.67	nu	nu	nu	132.0	63.8	nu	16.0	26	+	4.0	nu	nn	0.16	19.0	16.8	7.3
O 1/1a	20.7.67	96.0	45.6	22.0	101.2	26.0	nu	19.0	27	155	3.7	2.4	nn	0.05	24.1	12.9	7.2
Br V	20.7.67	102.4	32.2	26.4	104.5	29.4	nu	27.0	27	108	4.0	2.8	nn	nn	22.0	13.3	7.1

2. Grundwasserproben aus dem Tertiärsand (Oberes Grundwasserstockwerk)

E 9	27.4.67	75.7	16.9	nu	101.2	26.0	nn	10.6	7	nn	3.5	8.0	nu	nn	14.5	12.9	nu
E 4	27.4.67	73.6	18.6	nu	83.6	13.4	nn	1.7	14	nn	4.1	7.9	nu	nn	13.6	10.6	nu
E 3	27.4.67	54.1	31.6	nu	93.5	19.7	nn	8.9	15	36	5.0	6.9	nu	nn	14.9	11.9	nu
NS 34(9)	5.11.65	113.3	33.6	30.8	103.4	28.0	nn	34.0	120	61	nu	2.8	nn	nn	23.8	13.2	7.37
NS 34(13)	5.11.65	135.2	37.2	30.8	110.0	34.5	nn	35.0	135	60	nu	2.8	nn	nn	27.7	14.0	7.41
OS 16(0)	17.4.67	nu	nu	nu	105.6	30.0	nn	16.0	2	+	7.0	nu	nn	0.10	16.8	13.4	7.40

3. Grundwasserproben aus dem Tertiärsand (Tiefes Grundwasserstockwerk)

E 1	27.4.67	14.3	14.2	nu	52.60	3.5	nu	19.6	2	14	3.1	1.6	nu	nu	5.3	6.7	nu
25/27	2.5.66	nu	nu	nu	101.2	26.0	nu	46.0	32	++	10.0	nu	nn	nn	17.9	12.9	7.5
NS 639/T	2.5.66	nu	nu	nu	88.0	16.0	nn	14.0	17	nu	7.5	nu	nn	nn	15.7	11.2	8.8
OS 30/T	17.4.67	nu	nu	nu	96.80	22.2	nu	22.0	16	++	7.5	nu	nn	0.13	15.7	12.3	7.6
OS 16/T	17.4.67	nu	nu	nu	105.6	30.0	nu	16.0	4	+	6.0	nu	sp	sp	14.6	13.4	7.4

4. Grundwasserproben aus dem Tertär (Tiefbrunnen)

Br. 65	30.4.67	75.5	16.4	24.0	112.2	37.0	nu	11.0	nn	+	16.2	8.0	nn	nn	16.8	14.3	7.49
Br. 65	4.9.56	67.6	38.4	30.8	119.9	46.5	nu	16.3	nn	++	15.4	2.4	sp	0.02	18.5	15.2	7.37
Br. 90	7.3.56	32.0	18.6	19.8	99.0	22.6	nu	3.5	nn	+	12.0	1.6	sp	0.02	9.5	12.6	7.54
Br. 90	1.3.56	26.0	35.1	10.7	101.2	26.0	nu	8.9	2.0	3.6	10.6	nu	++	0.06	11.7	12.9	7.70
Br. H	11.1.55	36.9	21.6	15.4	91.3	18.1	nu	2.5	nn	+	15.0	1.6	sp	nn	9.8	11.6	7.50
Br. P	16.8.66	29.8	16.8	11.0	101.2	26.0	nn	6.4	3.8	15.0	14.0	2.0	sp	nn	8.1	12.9	7.88

In der Tabelle verwendete Abkürzungen:

nn = nicht nachweisbar

nu = nicht untersucht

sp = Spuren

++ = mäßige Mengen

++ = beträchtliche Mengen

geb. = gebunden

zugeh. (Tab.) = zugehörig nach der TILLMANNschen Tabelle (HÖLL 1960)

aggr. = Kalkaggressiv

(M-Vers.) = Marmorversuch

Tabelle 17 Grundwasserchemismus: Übersicht der Maximal- und Minimalwerte aus den in Tabelle 16 aufgeführten Analysen.

Grundwasserprobe aus dem Grundwasserleiter	Gesamthärte (°dGH)	Ca++ (mg/l)	Mg++ (mg/l)	Mg-Anteil der Gesamthärte in %	Karbonathärte °dKH
Quartärkies (1. GW-Stockwerk)	11,9-24,1 (13)	54,3-102,4 (3)	14,7-45,6 (8)	25,8- 44,9 (8)	10,8-15,1 (13)
Tertiärsand (1. GW-Stockwerk)	13,6-27,7 (6)	54,1-135,2 (5)	16,9-37,2 (5)	26,7- 49,0 (5)	11,9-14,0 (6)
Tertiärsand (2. GW-Stockwerk)	5,3-17,9 (5)	14,3 (1)	14,2 (1)	59,0 (1)	6,7-12,9 (5)
Tertiärkies u. -sand (Tiefbrunnen 60-100 m tief)	8,1-18,5 (6)	26,0-75,5 (6)	16,3-38,4 (6)	36,2- 69,3 (4)	11,6-18,5 (6)

Grundwasserprobe aus dem Grundwasserleiter	pH	CO ₂ geb. (mg/l)	CO ₂ frei (mg/l)	CO ₂ zugeh. (Tab.) (mg/l)	CO ₂ zugeh. (ber.) (mg/l) ~
Quartärkies (1. GW-Stockwerk)	7,1- 7,6 (7)	86,9-132,0 (13)	22,0-30,0 (3)	11,5- 63,8 (13)	11,5-30,8 (9)
Tertiärsand (1. GW-Stockwerk)	7,3- 7,4 (3)	83,6-110,0 (6)	30,8 (1)	12,5- 34,5 (5)	12,5-26,0 (2)
Tertiärsand (2. GW-Stockwerk)	7,4- 7,6 (5)	52,8-105,6 (5)	nu	3,5- 30,0 (5)	1,1 (1)
Tertiärkies u. -sand (Tiefbrunnen 60-100 m tief)	7,4- 7,9 (6)	91,3-119,9 (6)	10,7-30,3 (6)	18,2- 46,5 (6)	7,2-25,7 (4)

Grundwasserprobe aus dem Grundwasserleiter	Nichtkarbonat- härte (°dNKH)	Abdampfrückstand bei 105°C (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁻ (mg/l)
Quartärkies (1. GW-Stockwerk)	nn -11,2 (13)	404-571 (2)	1,7-60,0 (13)	2- 40 (13)	4-155 (6)
Tertiärsand (1. GW-Stockwerk)	1,6-13,7 (6)	nu	1,7-34,0 (6)	2-135 (6)	36- 61 (3)
Tertiärsand (2. GW-Stockwerk)	nn - 5,0 (5)	nu	14 -46,0 (5)	2- 32 (5)	14 (1)
Tertiärkies u. -sand (Tiefbrunnen 60-100 m tief)	nn - 3,2 (6)	201-405 (3)	2,5-16,3 (6)	2,0- 3,8 (2)	4,6-15,0 (2)

Grundwasserprobe aus dem Grundwasserleiter	O ₂ frei (mg/l)	NH ₄ ⁺ (mg/l)	Fe gesamt (mg/l)	KMnO ₄ -Verbrauch (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)
Quartärkies (1. GW-Stockwerk)	1-12,0 (7)	nn- 3 (6)	nn- 0,33(10)	2,4- 7,3 (9)	2,5- 6,4 (13)
Tertiärsand (1. GW-Stockwerk)	1- 5,0 (2)	nn- 1 (3)	nn- 0,10(6)	2,3- 8,0 (5)	3,5- 7,0 (4)
Tertiärsand (2. GW-Stockwerk)	1-10,0 (4)	nn-Spuren (4)	nn- 0,13(4)	1,6 (1)	3,1-10,0 (5)
Tertiärkies u. -sand (Tiefbrunnen 60-100 m tief)	nn - 0,6 (5)	nn bis be- trächtliche Mengen	nn- 0,06(6)	1,6-0,8 (5)	10 -16,2 (6)

In der Tabelle verwendete Abkürzungen:

nn = nicht nachweisbar
nu = nicht untersucht

geb. = gebunden
zugeh. (Tab.) = zugehörig nach der TILLMANNschen Tabelle (HÖLL 1960)
zugeh. (ber.) = zugehörig berechnet

TILLMANN (HÖLL 1960) als "zugehörige freie" bezeichnete Kohlensäure bewirkt keine Kalklösung, sondern verhindert nur die Abscheidung von Kalk. Bei echten Gleichgewichtswässern, wie sie auch im Münchner Raum auftreten, entspricht die festgestellte freie Kohlensäure in etwa (Ungenauigkeiten der Bestimmungsmethoden!) der zugehörigen Kohlensäure. Die zu jeder Karbonathärte rechnerisch gehörende freie Kohlensäure (= zugehörige) wird im allgemeinen nach einer Tabelle von TILLMANN (HÖLL 1960) bestimmt (Tab. 17 und 18). Die Tabellenwerte stimmen jedoch nur unter der Voraussetzung einer reinen Kalziumhydrogenkarbonatlösung. Da jedoch in den quartären Schottern und auch im Tertiär neben kalkigem auch dolomitisches Material vorkommt, so muß in unserem Fall auch das gelöste Magnesiumhydrogenkarbonat berücksichtigt werden.

Soweit bisher bekannt ist, sind keine oder nur geringe Mengen an freier Kohlensäure nötig, um das Magnesiumhydrogenkarbonat in Lösung zu halten. Es ist zum Teil in den untersuchten Wässern weniger freie Kohlensäure vorhanden als zugehörige Kohlensäure, die nach der Tabelle bestimmt wurde. Es muß daher die zugehörige Kohlensäure unter Berücksichtigung des Magnesiums berechnet werden (nach BODLÄNDER u. TILLMANN in: HÖLL 1960): Die Ergebnisse sind in Tabelle 18 aufgeführt.

Tabelle 18 Tabellarisch bestimmte (Tab.) und berechnete (ber.) zugehörige Kohlensäure

Probe	CO ₂ zugeh. (Tab.) mg/l	CO ₂ zugeh. (ber.) mg/l	Mg-Anteil d. Härte %
E 2	20.5	18.2	35.2
E 5	15.3	11.5	36.2
E 6	42.3	24.3	36.8
E 7	18.9	14.2	30.6
E 8	51.0	30.6	25.8
E 10	20.5	16.8	26.0
0 1/I a	26.0	24.5	43.4
Br. V	29.0	27.8	44.9
E 9	26.0	20.9	26.7
E 4	13.4	12.5	30.8
E 3	19.7	12.8	49.0

Vergleichen wir die Analysenwerte der Tabelle 16 mit der allgemeinen Charakteristik der Kalkschotterwässer nach GERB (1958) in Tabelle 15, so entsprechen die Wässer aus dem nichtüberbauten Stadtgebiet in ihrem Chemismus den typischen Kalkschotterwässern. Die im überbauten Stadtgebiet entnommenen Proben (NS 669, OS 134.01/Ia, Br. V) weisen im Gegensatz dazu beträchtlich höhere Gehalte an Chlorid, Sulfat und Nitrat (Tafel 22) und damit auch höhere Nicht-karbonathärten auf. Auch die Abdampfrückstände der Wässer aus den bebauten Gebieten sind höher als die aus den unbebauten und damit als die der typischen Kalkschotterwässer. Die Leitfähigkeit liegt für die abwasserbelasteten Wässer des Stadtgebietes zwischen 500 und 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, die der im unbebauten Stadtgebiet entnommenen Proben zwischen 290 und 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Daraus ergibt sich, daß die Grundwassereinzugsgebiete, die im bebauten Stadtgebiet liegen, erheblich durch Verunreinigungen, die möglicherweise aus undichten Kanälen, Versitzgruben oder gebrochenen Leitungen stammen, belastet sind. In größeren, nicht überbauten Versickerungsgebieten, wie z. B. im Englischen Garten, werden die verunreinigten Grundwässer, wie die wesentlich günstigeren Analysenergebnisse zeigen, durch die unmittelbare Versickerung der Niederschläge erheblich verdünnt. Die Alkaligehalte in diesen Wässern sind relativ gering: Die festgestellten Natriumgehalte betrugen unter 6 mg/l, die Kaliumgehalte bis maximal 5 mg/l.

Die aus den Tertiärsanden im oberen Grundwasserstockwerk entnommenen Wasserproben weisen gegenüber den im Quartärkies entnommenen Proben nur geringe Unterschiede auf. Es handelt sich wohl um ursprüngliche Kalkschotterwässer, die am Ort der Probennahme vorübergehend durch den tertiären Grundwasserleiter strömen und die in ihrer chemischen Beschaffenheit noch mehr oder weniger den Charakter ihres ursprünglichen Kalkschottereinzugsgebietes aufweisen. Dies wird insbesondere durch die praktisch gleichen Gehalte an Kieselsäure bestätigt: die Gehalte liegen bei den Wässern der Quartärkiese zwischen 2.5 und 6.4 mg/l, bei denen der Tertiärsande zwischen 3.5 und 7 mg/l. Nach GERB (1958) können Kieselsäuregehalte in den Kalkschotterwässern je nach dem Vorhandensein von silikatischen Geröllen und deren Verwitterungsgrad im allgemeinen zwischen 2 und 4 mg/l, in Ausnahmefällen auch bis 12 mg/l betragen. Die Alkaligehalte liegen allerdings deutlich höher als die in den Wässern im Kies: Das Natrium erreicht Gehalte bis zu 14 mg/l, das Kalium bis zu 12 mg/l. Auf diese Erscheinung wird im Abschnitt III, 7.22 noch eingegangen.

7.22 Tiefere Grundwasserstockwerke

Die Grundwässer der tieferen Stockwerke im Tertiär lassen sich, wie folgt, charakterisieren:

alkalische, mittelharte bis ziemlich harte, zum Teil sauerstoffarme, nicht kalkaggressive Wässer;

pH-Werte zwischen 7.37 und 8.90;

schwankende, meist aber relativ geringe Chlorid-, Sulfat- und Nitratgehalte;

Nichtkarbonathärte zwischen 0 und 5.1° d.

Nicht selten überwiegt die scheinbare Karbonathärte die Gesamthärte: Natriumgehalte bis 20 mg/l sind nachgewiesen.

Bei den Tiefenwässern handelt es sich meist um sauerstoffarme Wässer mit geringen Eisengehalten.

Chlorid, Nitrat und Sulfat tritt in den Tiefenwässern nur in untergeordneten Gehalten auf.

Kieselsäure im allgemeinen zwischen 10 und 15 mg/l.

Magnesiumanteil der Härte zwischen 36.2 und 69.3 %.

Nur zum Teil entsprechen die Analysenwerte der von GERB (1958) aufgestellten Charakteristik der Tertiärwässer. Es ist vielfach so, daß die für die Tertiärwässer typische kalkaggressive Kohlensäure nicht nachweisbar ist. Die Leitfähigkeit liegt im allgemeinen bei 200 bis 270 µS/cm. Weiterhin zieht die Tabelle 17, daß die Chlorid-, Nitrat- und Sulfatgehalte im allgemeinen deutlich geringer sind, als die des oberen Grundwasserstockwerks. Die ziemlich dichten Grundwasserdeckflächen und wohl auch die tiefere Lage der Wässer im Tertiär verhindern oder vermindern die Belastung der tieferen Grundwasserstockwerke durch das Abwasser. Da die Tiefenwässer, nach den wenigen vorliegenden Analysen zu schließen, auch im Kalkkohlen säuregleichgewicht stehen, so ergibt sich, daß diese Wässer der tieferen Grundwasserstockwerke auch ursprünglich aus Einzugsgebieten des Quartärs stammen: mehr oder weniger belastete Wässer des oberen Grundwasserstockwerks, die wahrscheinlich aus entfernteren Gebieten der Schotterebene stammen (geringere Belastung), sickerten in die Grundwasserleiter des Tertiärs ein und nahmen, bedingt durch die langsame Fließgeschwindigkeit im Tertiärsand, allmählich im Kontakt mit den Gesteinsmineralien des tertiären Grundwasserleiters andere chemische Eigenschaften an. Je nach der Länge der Verweilzeit gewinnen die ehemaligen Kalkwässer im tertiären Grund-

wasserleiter andersartige und verschiedene chemische Beschaffenheiten.

Bei den Tiefenwässern, die im allgemeinen nur sehr geringe Gehalte an freiem Sauerstoff aufweisen, treten Spuren von Schwefelwasserstoff auf. Außerdem enthalten sie auch meist geringe Mengen an zweiwertigem Eisen und zweiwertigem Mangan. Es handelt sich also wohl um "reduzierte", metallaggressive Wässer.

Wie schon erwähnt, sind auch bei den Grundwässern in der tertiären Grundwasserleitern oft Alkaligehalte nachgewiesen, d.h. häufig überwiegt die Karbonathärte die Gesamthärte. Die Natriumgehalte betragen meist ca. 18-20 mg/l, die Kaliumgehalte liegen zwischen 8 und 12 mg/l. Diese hohen Alkaligehalte bedingen dann auch hohe p_H -Werte (bis 8, 9). Die Entstehung dieser natriumhydrogenkarbonathaltigen Wässer läßt sich durch Ionenaustauschvorgänge im Grundwasserleiter erklären. Nach SCHWILLE (1954), GERB (1958) u. a. wirken Gesteine, die vorwiegend Tonmineralien, Glimmer und glimmerähnliche Minerale, Glaukonit und Feldspäte enthalten, gerne kationenaustauschend auf das Grundwasser. Ein Mineralbestand also, der mit Ausnahme des Glaukonits, auch bei den tertiären Sedimenten im Münchner Raum gegeben ist.

Die Austauschvorgänge laufen nach SCHWILLE (1954) sehr rasch und nahezu unabhängig von der Temperatur ab. Die Austauschkapazität hängt in gewissem Umfang von der Teilchengröße der Mineralien und damit von der inneren, benetzbaren Oberfläche der Gesteine ab. Insbesondere sind solche Austauscheffekte an Gesteinen mit geringen Durchlässigkeiten bzw. aus Brunnen mit mäßigen Ergiebigkeiten bekannt geworden. Auch diese geringen Durchlässigkeiten sind in den Tertiärsanden gegeben (vgl. III, 4. 2).

7.23 Zeitliche Schwankungen

Der Chemismus der Grundwässer ist auch zeitlichen Schwankungen unterworfen. Zum Studium dieser Veränderungen wurden zwei Untersuchungsreihen durchgeführt, bei denen einmal an zwei "Quartärbrunnen" (Absenkbrunnen Ia und 1, Baulos 01; Oberes Grundwasserstockwerk) und zum anderen an einem "Tertiärpegel" (Pegel E 1, Englischer Garten; Zweites Grundwasserstockwerk) die Gesamthärte, die Karbonathärte und die Leitfähigkeit als Maß für den gesamten gelösten Salzgehalt in regelmäßigen Zeitabständen bestimmt wurden.

Tabelle 19 Leitfähigkeiten, Gesamthärten und Karbonathärten
in den Absenkbrunnen Ia und 1 des Bauloses 01
(Die Kästchen bezeichnen die Extremwerte)

Datum	Leitfähigkeit µS/cm	Gesamthärte °dGH	Karbonathärte °dKH
<u>Brunnen Ia</u>			
29. 8.67	-	19.6	11.7
5. 9.67	-	21.0	13.1
12. 9.67	-	19.9	12.7
19. 9.67	695	19.6	14.0
27. 9.67	710	19.9	12.2
12.10.67	550	17.4	11.6
25.10.67	700	22.7	13.30
7.11.67	755	23.5	13.44
21.11.67	655	20.4	13.3
5.12.67	665	22.7	14.0
29.12.67	636	22.7	13.6
22. 1.68	690	23.3	13.3
29. 1.68	679	23.2	13.4
<u>Brunnen 1</u>			
14. 2.68	242	15.7	12.6
19. 2.68	312	18.2	12.9
8. 3.68	534	18.9	12.9
28. 3.68	480	15.9	12.6
3. 4.68	495	18.2	14.3
8. 4.68	-	19.9	12.7
26. 4.68	-	19.9	13.6
2. 5.68	-	18.2	12.7
6. 5.68	610	21.9	13.3

Hierbei zeigte sich trotz der kurzen Beobachtungszeit, daß im Tertiärpegel die Gesamthärte im Laufe von fünf Monaten zwischen 5.6 und 7.0° d und die Leitfähigkeit zwischen 205 und 270 $\mu\text{S}/\text{cm}$ schwankte. Die scheinbaren Karbonathärten lagen zwischen 7.1 und 8.7° dKH.

Die Ergebnisse bei den Quartärbrunnen sind in der Tabelle 19 wiedergegeben. Im Beobachtungszeitraum schwankte die Gesamthärte zwischen 17.4 und 23.5° dGH (Ia) bzw. zwischen 15.7 und 21.9° dGH (1), die Karbonathärte zwischen 11.6 und 14.0° dKH (Ia) bzw. zwischen 12.6 und 14.3° dKH (1) und die Leitfähigkeit zwischen 550 und 755 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Ia) bzw. zwischen 242 und 610 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (1).

Möglicherweise kann das starke Absinken der Gesamthärte bzw. der Leitfähigkeit bei den Quartärbrunnen durch die Grundwasserabsenkmaßnahmen im Rahmen des U-Bahn-Baues erklärt werden. Durch die ständige und dauernde Absenkung wurden vorübergehend unbelastete Einzugsgebiete des Grundwassers erschlossen, die zu einer Verbesserung der Wasserqualität beitrugen. Endgültiges kann jedoch erst nach einem längeren Beobachtungszeitraum ausgesagt werden.

7.3 Beurteilung

Selbstverständlich sind die oberen Grundwasserstockwerke im Stadtgebiet als Trinkwasser ungeeignet.

Die Tiefenwässer sind im allgemeinen für die Trinkwasserversorgung geeignet; sie müssen jedoch wegen ihrer Metallaggressivität meist belüftet werden. Für die Betonaggressivität dieser Grundwässer sind die Vorschriften der DIN 4030 und die Richtlinien des Vereins Deutscher Zementwerke (LOCHER u. PISTER 1966/67) maßgeblich.

Nach ihren chemischen Reaktionen lassen sich in zwei Arten des Einwirkens von Grundwasser auf Beton unterscheiden: einmal wird das Kalziumhydroxyd des Betons durch weiche Wässer, Säuren, starke Basen und austauschfähige Salze (Cl^- , NO_3^- des NH_4^+ , Mg, Al, Fe) gelöst. Zum anderen führen sulfatreiche Wässer zur Neubildung von Sulfoaluminatkristallen mit einem größeren Raumbedarf ("Treiben").

Da aber die Wirkung der betonangreifenden Bestandteile im Wasser in erster Linie von ihren Konzentrationen abhängt, so sind erst besondere Schutzmaßnahmen erforderlich, wenn bestimmte Grenzkonzentrationen überschritten werden. Bei geringeren Gehalten finden die chemischen Umsetzungen nur an der Oberfläche des Betons statt. Außerdem spielt auch die Durchlässigkeit des Bodens eine gewisse Rolle: strömende Wässer sind wegen der Materialabfuhr gefährlicher als stehende.

Die üblichen Grenzwerte für die Betonschädlichkeit und die festgestellten Extremgehalte der Grundwässer im Baubereich der Münchner U-Bahn, also ohne Berücksichtigung der Tiefenwässer, sind in Tabelle 20 eingetragen.

Wie die Tabelle 20 zeigt, werden die Grenzkonzentrationen für eine Betonaggressivität für keinen der möglichen Parameter erreicht. Die Grundwässer, die beim U-Bahn-Bau angetroffen wurden, erwiesen sich also als nicht "betonschädlich".

Von manchen Autoren wird darauf hingewiesen, daß schon erheblich geringere Sulfatgehalte als 200 mg/l je nach der Gesamthärte betonschädlich sein können (ab 70 mg/l). Da aber ein hoher Chloridgehalt, wie er bei den untersuchten Wässern bei einem höheren Sulfatgehalt ebenfalls immer vorliegt, den Sulfatangriff abschwächt, ist auch im Falle des Sulfats keine Betonschädlichkeit nachweisbar.

Tabelle 20 Zur Betonaggressivität der Grundwässer

	schädliche Grenzwerte	festgestellte Extremwerte
pH	< 6.5	7.1 - 7.6
CO ₂ agg.	> 15 mg/l	nicht nachweisbar
NH ₄	> 15 mg/l	bis 3 mg/l
Mg ⁺⁺	> 100 mg/l	14.7 - 45.6 mg/l
SO ₄ ⁻⁻	> 200 mg/l	4 - 155 mg/l
KMnO ₄ ⁻ Verbrauch	> 25 mg/l	1.6 - 8.0 mg/l
CO ₃ -Härte	< 2° d	6.7 - 15.1° d
Ges. -Härte	< 4° d	5.3 - 27.7° d

8. Grundwassertemperatur

8.1 Untersuchungsmethode

Die Temperatur des Grundwassers vermag zuweilen wichtige hydrologische Aussagen zu geben. Es wurde daher im Rahmen der hydrologischen Untersuchungen im Englischen Garten die Temperatur des Grundwassers in verschiedenen Pegeln und mit verschiedenen Meßgeräten beobachtet. Die Messungen wurden unter der Leitung von Herrn Ing. R. EVERMANN von Herrn A. MAYER, Bayerische Landesstelle für Gewässerkunde München, sehr sorgfältig durchgeführt. Beiden Herren sei für ihr freundliches Entgegenkommen gedankt.

Es zeigte sich, daß die Untersuchungsergebnisse zum Teil wesentlich von den verwendeten Meßinstrumenten abhängen. Das vielfach übliche Schöpfthermometer versagt in größeren Wassertiefen, da der langsame Wasseraustausch im Schöpfbecher nur eine unzureichende Meßgenauigkeit zuläßt. Es wurden, je nach Tiefe, Abweichungen der Schöpfthermometermessungen zu den elektrischen Messungen bis zu einem Grad festgestellt (Tafel 23: bei Punkt a im Temperaturprofil E 1 z.B. 0.5°C).

Die Meßdaten verschiedener elektrischer Temperaturmeßgeräte (System Ter-mophil, System Hofbauer) wiesen z.T. erhebliche Verschiedenheiten auf. Die Unstimmigkeiten zwischen diesen Geräten konnten inzwischen weitgehend beseitigt werden. Sie beruhten auf geringfügigen Beschädigungen der Kabel oder Sonden. Es empfiehlt sich daher bei solchen Messungen immer, mit mehreren Geräten zu arbeiten und regelmäßige Überprüfungen und Nacheichungen (Nullpunktverschiebungen) vorzunehmen. Geringe Schwankungen in der Größenordnung von einem bis drei Zehntel Grad liegen jedoch im Bereich der Meß- und Ablesegenauigkeit. Möglicherweise führt auch das Aus- und Einführen der Meßsonden im Pegel zu geringfügigen Fehlern. Diese Frage könnte nur durch einen Vergleich der Meßergebnisse eines Temperaturmeßpunktes im Pegel mit den Ergebnissen eines an dieser Stelle im Pegel fest eingebauten Widerstandsthermometers überprüft werden.

8.2 Untersuchungsergebnisse

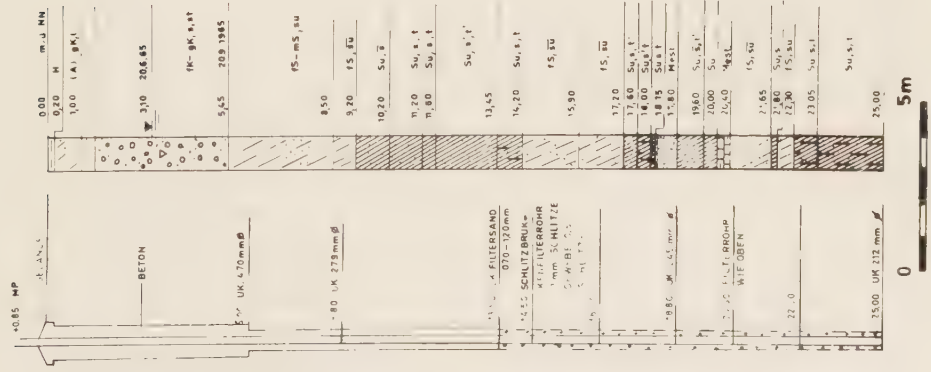
In den Pegeln im Englischen Garten wurden Temperaturprofile, z. T. mit verschiedenen Meßgeräten, ermittelt. In der Tafel 23 sind zwei solche Profile aufgezeichnet. Auffällig sind die starken Schwankungen der Temperaturen im Vollrohr und die relative Konstanz der Temperaturen in den Filterstrecken. Im Vollrohr dürfte die Temperatur von den gut wärmeleitenden Metallrohren und damit von der Lufttemperatur bestimmt werden. Nur im Filterbereich, der vom Grundwasser durchströmt wird, ergeben sich reale Meßwerte der Grundwassertemperatur. Schon aus dem Temperaturprofil ließ sich der Einfluß der Tiefe und der Ausbildung des Grundwasserleiters auf die Temperatur vermuten. Aus diesen Gründen wurden sodann für die regelmäßige Beobachtung Temperaturmeßpunkte nur im gefilterten Rohrbereich und an repräsentativen Stellen der einzelnen Grundwasserleiter festgesetzt.

Die Ergebnisse der bisherigen Beobachtung zweier Pegel sind in der Tafel 24 aufgetragen. Die absoluten Zahlenwerte sind bei der Verschiedenheit der angewandten Meßgeräte und der relativ kurzen Beobachtungszeit noch nicht repräsentativ; vergleichend betrachtet lassen sich aber dennoch schon einige Gesetzmäßigkeiten deutlich erkennen.

Der Temperaturgang im 2. Grundwasserstockwerk (Tafel 24: Profil E 1/15) ist gegenüber dem im oberen Grundwasserstockwerk wesentlich ausgeglichener: es treten während des Jahres nur geringe Schwankungen zwischen 10.2 und 10.8°C auf. Im Mittel nähert sich diese Temperatur schon der mittleren Jahrestemperatur der Luft.

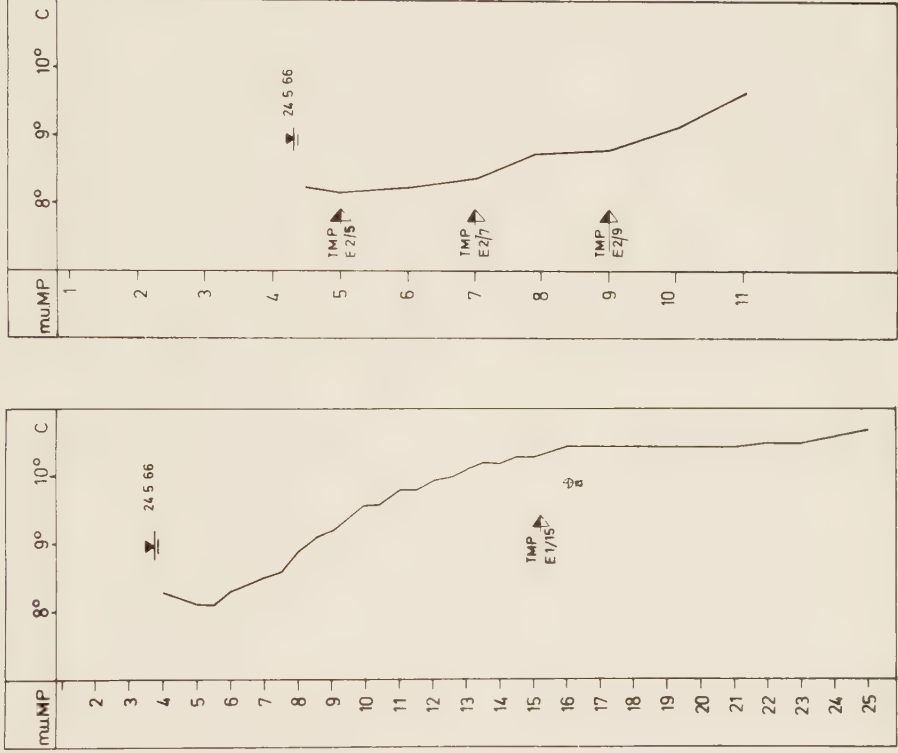
Im ersten Grundwasserstockwerk weist die Temperatur einen ausgeprägten jahreszeitlichen Gang auf. Die Wassertemperaturen sinken im Frühjahr tiefer als die Temperaturen des Tertiärwassers im zweiten Stockwerk ab. Sie steigen in den Sommer- und Herbstmonaten dagegen wiederum höher an als die Temperaturen des Tertiärwassers (Tafel 24). Generell wurden die wärmsten Temperaturen etwa Mitte bis Ende November gemessen, während die niedrigsten Temperaturen etwa Anfang Mai auftraten. Eine gewisse zeitliche Verschiebung ist jedoch je nach Lage der Pegel zu erkennen.

BOHRUNG E1

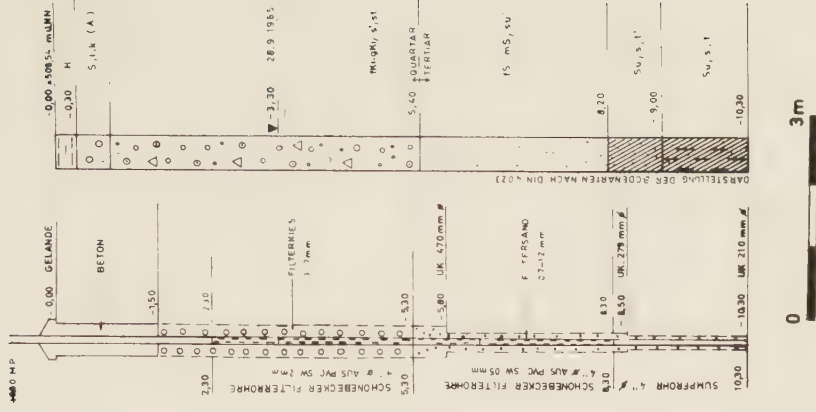


TEMPERATURPROFILE

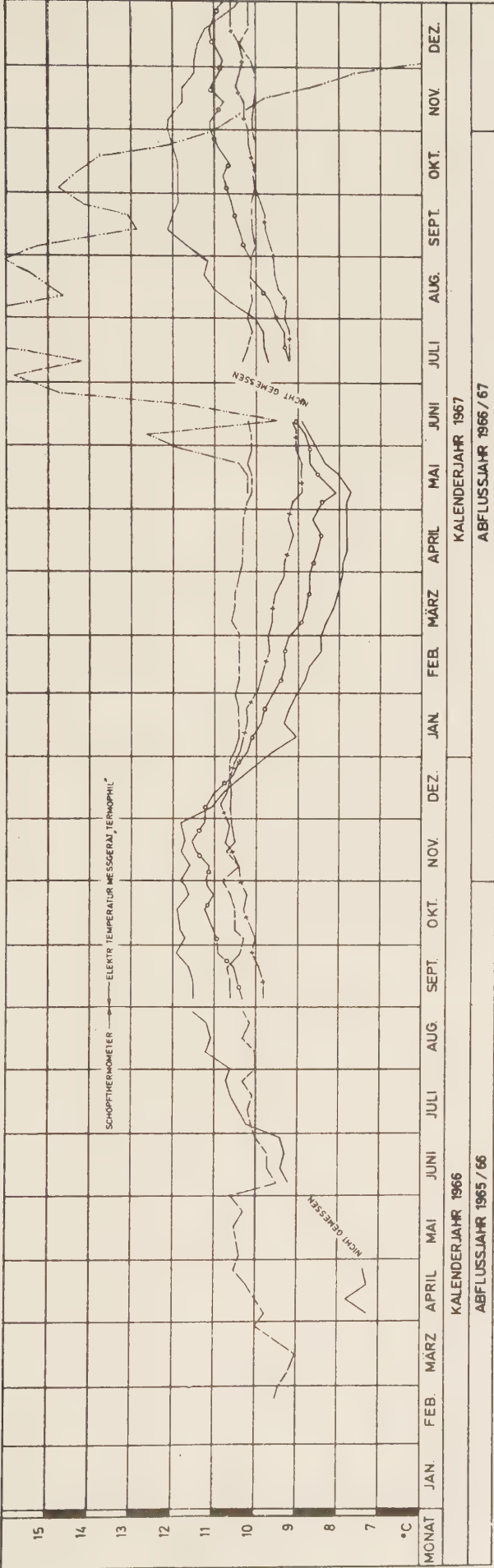
E 2



BOHRUNG E2



Tafel 23 Pegelausbau, Bohrprofil und Temperaturprofil der Grundwassermeßstellen E 1 und E 2 (TMP = Temperaturmeßpunkt im Pegel)



Tafel 24 Grundwassertemperatur-Ganglinien der Grundwassermessstellen E 1 und E 2

Die Wassertemperaturen haben aber nicht nur einen jahreszeitlichen Gang sondern unterscheiden sich in ihren Maxima und Minima je nach der Tiefe des Meßpunktes und den dort anstehenden geologischen Schichten. In der Tafel 24 sieht man deutlich, daß die Temperaturen im Quartärkies stärker schwanken als die in darunterliegenden tertiären Sanden. Im Quartär lag der Schwankungsbereich während des Beobachtungszeitraumes (für einen Meßpunkt) bei 4.1°C , während der Schwankungsbereich im Tertiär (für drei Meßpunkte) zwischen 3.4 und 1.9°C je nach Teufe des Meßpunktes lag. Die höchste Temperatur wurde am Pegel E 2 im Quartär mit 11.8°C am 14.11.1966, die niedrigste Temperatur mit 7.7°C am 8.5.1967 gemessen. Im Tertiär wurde in 7 m Tiefe (1. Grundwasserstockwerk) die höchste Temperatur mit 11.5°C am 21.11.1967 und die niedrigste mit 8.1°C am 8.5.1967 erreicht. In 9 Meter Tiefe (1. Grundwasserstockwerk) ergaben sich als Maximum nur 10.8°C am 21.11.1967 und 5.12.1967 und als Minimum 8.9°C am 8.5.1967. Die Minima im 1. Grundwasserstockwerk liegen also erheblich unter den Temperaturen des 2. Grundwasserstockwerks, wie sie im Pegel E 1 am Meßpunkt E 1/15 festgestellt wurden.

Diese Erscheinung dürfte zumindest teilweise auf die geringen Fließgeschwindigkeiten des Grundwassers in den Tertiärsanden zurückzuführen sein. Den Einfluß der Fließgeschwindigkeiten auf die Temperatur des Grundwassers wurde übrigens von TRUEB (1962) nachgewiesen. Der Austausch und die Erneuerung des Grundwassers geht in den tertiären Sedimenten wesentlich langsamer vor sich, als in den grobkörnigeren quartären Schottern.

IV. Geotechnische Verhältnisse

1. Angewandte Bauweisen

Beim Münchner U-Bahn-Bau wird je nach den technischen Gegebenheiten mit verschiedenen Baumethoden gebaut. Die offene Bauweise "findet dort ihre Anwendung, wo ausreichender Platz für die offenen Baugruben vorhanden ist, also außerhalb der engsten Innenstadt. Die bergmännischen Bauweisen werden dort gewählt, wo beengter Raum, Verkehr und Anliegerbedingungen die offene Bauweise technisch oder wirtschaftlich verbieten" (ZIMNIOK und das U-Bahn-Referat, 1967). Ausführliche Beschreibungen der einzelnen Bauweisen sind in den Informationen des U-Bahn-Referats (SARKÖZY 1966, 1967) und in den einschlägigen Veröffentlichungen von ZIMNIOK (1967 a, b), ZIMNIOK, JOAS, SARKÖZY (1967) und ZIMNIOK, CHAHBASIAN, SARKÖZY (1967) enthalten.

1.1 Offene Bauweise

Der nördliche Teil der U-Bahn-Trasse zwischen Münchner Freiheit und Finauerstraße wird in offener Bauweise mit offenen, nicht abgedeckten Baugruben gebaut. Nach Verlegung aller Versorgungsleitungen und Kanäle werden entlang der geplanten Baugrube Stahlprofilträger im Abstand von 2.50 m senkrecht in vorgebohrte Löcher bis 2 m unter die projektierte Baugrubensohle in den Untergrund versenkt. Nach Beginn des Erdaushubs werden die Baugrubenwände dann mit Bohlen zwischen den Bohrträgern verbaut. Mit zunehmender Baugrubentiefe werden in der Regel in drei Niveaus horizontale Querversteifungen oder Injektionszuganker eingebracht, um den seitlichen Erddruck aufzunehmen.

Die Bahnhöfe werden im allgemeinen in offener Bauweise erstellt. In der Innenstadt wird durch befahrbare Abdeckungen der Verkehr über der Baugrube auch während der Bauzeit aufrecht erhalten.

Bei der sogenannten "Deckelbauweise" (ZIMNIOK, 1967 b), die z. B. am Marienplatz und am Stachus angewandt wird, wird auf Schlitzwänden, die das geplante Bauwerk umfassen, und auf vorgebohrten Stützen zuerst die oberste Decke des Bauwerks hergestellt. Unter dieser Decke wird dann im Schutze der Schlitzwand die Baugrube abschnittsweise ausgehoben, während der Verkehr auf der Oberfläche ungestört weiterfließt.

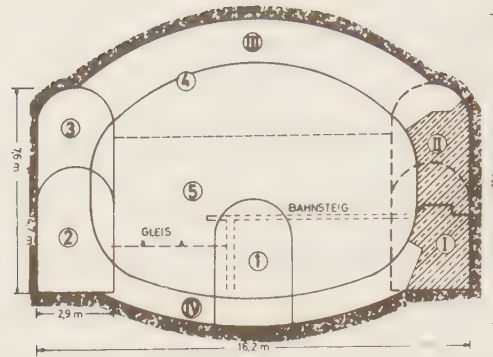
Die fertigen Bahnhöfe sind isoliert, da sie im Grundwasser liegen, während bei den in offener Bauweise hergestellten Strecken ein wasserdichter Sperrbeton den Grundwassereintritt verhindert.

1.2 Bergmännische Bauweise

Die bergmännischen Vortriebe werden immer von einem in offener Bauweise erstellten Startschacht aus begonnen. Ebenso enden sie in offenen Baugruben in den sogenannten Zielschächten. Über die Startschächte wird der Erdaushub abtransportiert und das Auskleidungsmaterial eingebracht (ZIMNIOK und das U-Bahn-Referat, 1967).

Die Streckentunnel im Innenstadtbereich werden im "vollmechanischen Schildvortrieb" erstellt, wobei für jedes Fahrgleis ein eigener Tunnel aufgeföhren wird. Beim Schildvortrieb wird ein großer, offener Stahlblechzylinder (Schild) horizontal in das Anstehende vorgedrückt. In seinem vorderen Teil, - der Schild hat eine Länge von 5 - 6 m und einen Außendurchmesser von 6.72 m, - wird das Gebirge durch ein Fräsräd abgebaut, während im hinteren Teil (Schildschwanz) der rund ausgegrabene Stollen durch Stahlbetonfertigteile (Tübbings) ausgebaut wird. Der Zwischenraum zwischen den Tübbingaußenseiten und dem Gebirge wird durch Injektionen mit einem Spezialmörtel satt verpreßt. Die Tübbings nehmen den Gebirgsdruck auf, während eine zweite Innenschale, die nach Anbringen der Abdichtung in Ortbeton hergestellt wird, den Druck des Grundwassers aufnimmt (ZIMNIOK 1967 b).

Der Bahnhof Marienplatz liegt zum größten Teil unter dem Münchner Rathaus. Hier werden, da der Querschnitt eines Bahnhofes mit ca. 150 m^2 wesentlich größer ist als die Querschnitte der Schildtunnel (30 m^2), zuerst ein Sohlstollen (Abb. 24, ①) und zwei Ulmenstollen (Abb. 24, ②) von jeweils ca. 10 m^2 Querschnitt vorgetrieben. Bei dem hierbei angewandten Messervortrieb werden messerförmige, spundwandartig ineinander verzahnte Stahlteile (= "Messer") auf einem Stützgerüst, je nach dem Fortschritt des darunter von Hand vor sich gehenden Erdaushubs, einzeln vorgetrieben. Die Auskleidung der Stollen erfolgt im Schutz der Messer mit Wellblech und Stahlausbaubögen, der Zwischenraum zwischen Gebirge und Aussteifung wird mit Zementmörtel verpreßt. Die Ulmenstollen (Abb. 24 ③) werden nach oben aufgeweitet und nach Fertigstellung der



1. Vortrieb u. Ausbau d. Sohlstollens (I), nachlaufend Vortrieb u. Ausbau beider unteren Ulmenstollen (II).
2. Betonieren d. unteren Ulmenstollen (I).
3. Vortrieb u. Ausbau d. beiden oberen Ulmenstollen (III), nachlaufend betonieren (II).
4. Ausbruch d. Kalotte (4), betonieren (IV).
5. Kernaushub (5).
6. Betonieren d. Sohle (IV).

Abb. 24 Reihenfolge der Ausbruchabschnitte und der Betonierung der Außenschale des östlichen Bahnhofstunnels Marienplatz unter dem Rathaus

Außenwände wird die Kalotte (Abb. 24, (4)) ausgebrochen und das Gewölbe im Schutze der Messer betoniert. Danach wird der Kern ausgebrochen (Abb. 24 (5)) und das Sohlgewölbe eingezogen. Der fertige Tunnel wird schließlich wie ein Schildtunnel abgedichtet und mit einer zweiten Innenschale versehen (ZIMNIOK und das U-Bahn-Referat, 1967)

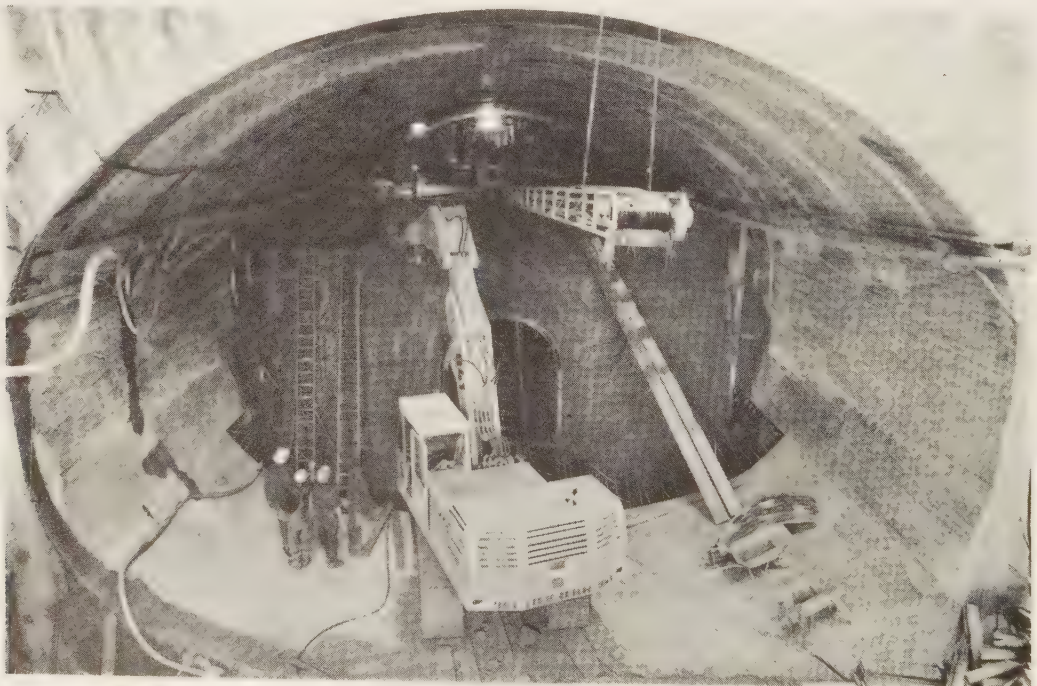


Abb. 25 Kernaushub im östlichen Bahnhofstunnel Marienplatz unter dem Rathaus

2. Bautechnische Beurteilung und Klassifizierung der Bodenschichten

Die im Trassenbereich angefahrenen quartären und tertiären Sedimente werden auf Grund ihrer sedimentpetrographischen, bodenmechanischen und geotechnischen Eigenschaften zu verschiedenen Haupterscheinungstypen zusammengefaßt (vgl. II, 2 und 3).

2.1 Bodenarten und Gesteinsarten des Quartärs

Klassifiziert man die Bodenarten nach ihrer Lösbarkeit, so läßt sich nach DIN 18300 folgende Beurteilung geben:

Mutterboden

Im allgemeinen liegt in unbebauten Gebieten zuoberst ein kiesiger bis stark kiesiger Humus in Mächtigkeiten zwischen 0.20 und 0.40 m. Wie die Baugrubenaufschlüsse zeigten, fanden sich vereinzelt an einigen Stellen unter ein bis zwei Meter mächtigen Auffüllungen auch ältere Humusschichten. Sie sind jedoch meist von geringer Ausdehnung.

Diese Bodenarten entsprechen der Bodenklasse 2.21 (Mutterboden), seltener auch 2.23 (leichter Boden).

Auffüllung

Bei der sogenannten Auffüllung handelt es sich um von Menschenhand umgelagerte Quartärkiese, die z. T. erheblich mit Bauschutt, z. T. auch mit tertiärem Material vermischt sind. Die Auffüllungen können bis zu 6 und 8 m mächtig sein.

Diese Schichten sind bisweilen setzungsempfindlich; sie gehören in die Bodenklasse 2.23 (leichter Boden).

Kiese

Bei den quartären Kiesen, die in Mächtigkeiten zwischen 3 und 15 m längs der Trasse aufgeschlossen wurden, handelt es sich um Fein-Grobkiese mit sehr unterschiedlichen Sand- und Schluffgehalten: neben Rollkieslagen finden sich auch Linsen, in denen das Zwischenmittel überwiegend schluffig ist. Diese Wechsellagerungen meist geringmächtiger, gut durchlässiger und schlecht durchlässiger Lagen bedingen den meist nur geringen Erfolg von Zementinjektionen.

In natürlicher Lagerung sind die Quartärkiese praktisch setzungsunempfindlich. Da sie häufig auch große Gerölle (Steine) über 60 mm Kantenlänge (bis 250 mm Ø) enthalten, gehören sie nicht allein zur Bodenklasse 2.23 (leichter Boden), sondern auch zur Bodenklasse 2.24 (mittelschwerer Boden). Erfahrungsgemäß behindern diese "Maximalgerölle" (vgl. II, 2.1) das Lösen, Laden und Fördern dieses Bodens nicht besonders.

Im Quartärkies wurden diagenetisch verfestigte Kiese (Konglomerate oder Nagelfluh) bisher nicht festgestellt. Sie würden den Bodenklassen 2.27 - 2.28 ("Fels") entsprechen.

Schluffe und Sande

Wie in Abschnitt II, 2 erläutert, traten in den quartären Schichten bisher nur selten geringmächtige (0.20 - 0.50 m) Sand- und Schlufflagen auf. Bei den Sanden handelt es sich um lockere Fein-Mittelsande, bei den Schluffen um sandige, z.T. kalkreiche Löß- oder Schwemmllehme.

Die Sande entsprechen der Bodenklasse 2.23 (leichter Boden), die Schluffe der Bodenklasse 2.25 (bindiger, mittelschwerer Boden). Da sie bisher nur in geringen Ausdehnungen angefahren wurden, wirken sie sich beim Erdaushub des Kieses praktisch nicht aus. Sie konnten daher bei den Abrechnungsgruppen in Tabelle 21 vernachlässigt werden.

2.2 Bodenarten und Gesteinsarten des Tertiärs

Sande

Die Flinzsande treten (vgl. II, 3.2) in drei Haupttypen auf, sie lassen sich auf Grund ihrer bodenmechanischen Kennwerte und auch durch Augenschein im Anstehenden deutlich unterscheiden.

Die Haupttypen der Mittelsande und der Fein-Mittelsande kommen meist in 2 - 10 m mächtigen, ausgedehnten Lagen vor. Sie sind relativ gleichkörnig, ihre Lagerung ist dicht ($D = 0.59 - 1.20$); sie sind nur wenig setzungsempfindlich. Ihre Schluffgehalte liegen unter 20 %. Es handelt sich daher um leichte Böden der Bodenklasse 2.23.

Ebenso entsprechen die in geringmächtigen Linsen in diesen Sanden vorkommenden stark sandigen, fein-mittelkörnigen Quarzkiese der Bodenklasse 2.23 (leichter Boden).

Die schluffigen oder stark schluffigen Feinsande, die meist in oder unterhalb der mächtigen Flinzmergelschichten ohne scharfe Schichtgrenzen als relativ geringmächtige Linsen (0.2 - 2.0 m) ausgebildet sind, gehören wegen ihres meist hohen Schluffgehaltes (20 %) zur Bodenklasse 2.25 (bindiger, mittelschwerer Boden).

Durch die diagenetische Verfestigung (vgl. II, 3.1) entstehen bis zu faustgroße Sandsteinknollen (Konkretionen) oder auch bis 0.5 m mächtige Sandsteinbänke, die über die ganze Baugrube streichen können. Diese Sandsteinbänke sind als Fels der Bodenklasse 2.27 - 2.28 zu bezeichnen.

Schluffe, Tone und Mergelsteine

Im Flinzmergel treten alle Mischungsverhältnisse zwischen stark schluffigen Tonen und stark sandigen Schluffen auf. Der Kalkgehalt schwankt zwischen 0 und 65 %. Die diagenetischen Verfestigungen (Mergelstein) haben Kalkgehalte bis über 83 %. Ausgedehnte Mergelsteinbänke werden bis zu 1.5 m mächtig. Auch mikroskopisch kleine bis faustgroße, z.T. kreidige, z.T. harte Kalkkonkretionen sind keine Seltenheit.

An der Oberkante der Flinzmergelschichten tritt häufig eine 1 - 2 m mächtige, meist gelb-grünliche Varietät des Mergels auf; sie zeigt eine deutliche Bröckelstruktur (vgl. II, 3.1). Auch Klüfte und Harnische sind zu finden, wenngleich sie nur einen geringen Bereich erfassen.

Eine eindeutige Klassifizierung dieser Bodenarten ist praktisch nicht möglich. Streng genommen treten hinsichtlich der Lösbarkeit des Bodens alle Klassen zwischen 2.23 (leichter Boden) und 2.28 (schwerer Fels) auf. In der Hauptsache überwiegen jedoch die Bodenklassen 2.25 und 2.26. Die diagenetisch verfestigten Zonen ("Bänke") gehören zu den Bodenklassen 2.27 und 2.28 (leichter bis schwerer Fels), da es sich hier um echte Gesteinsarten handelt.

Tabelle 21 Klassifizierung der Bodenarten nach ihrer Lösbarkeit gemäß der DIN 18300

Sediment	Bodenart, Gesteinsart	Vorkommen Mächtigkeit	Bodenklasse	Abrechnungs- gruppen
Mutterboden	H, ki bis Ki, h	0, 20 - 0, 40 m, in Ausnah- men bis 1, 0 m	2, 21 Mutterboden bis leichter Boden 2, 23	I a
Auffüllung	(f - gKi, s, st) A	1, 0 - 8, 0 m z. T. mit Bauschutt	2, 23 leichter Boden bis mittelschwerer 2, 24 Boden	I
Quartäre Kiese	f - gKi, s, st, z. T. su	3 - 15 m	2, 23 leichter Boden bis mittelschwe- rer Boden 2, 24	I b
Mittelsande Fein-Mittel- sande	mS, fs' f - mS, su' - su	2 - 10 m mächtige, zusam- menhängende Schichtpakete (z. T. mit Quarzkieslinsen, Sst-Knollen)	2, 23 leichter Boden	
Schluffige Fein- sande	fS, su - sü	im allgemeinen < 2m, klei- nere Linsen im Flinzmer- gel ohne scharfe Grenzen	bindiger, mittel- schwerer Boden 2, 25	II a
Mergel	T, sü, s' bis Su, s - s̄, t' - t	0, 50 - 10 m (z. T. mit Kalkkonkretio- nen)	2, 25 bindiger, mittel- schwerer Boden 2, 26 bis schwerer Boden	II
Mergelstein	Mest (Fels)	0, 2 - 1, 5 m (bank- und horizontartige Verfesti- gungszonen; hohe Kalkgehalte)	2, 27 leichter Fels bis schwerer 2, 28 Fels	II b
Sandstein	Sst (Fels)	0, 2 - 0, 5 m (meist nur Knollen)	2, 27 leichter Fels bis schwerer Fels 2, 28	(III)
Konglomerat	Kgl (Fels)	bisher nicht aufgetreten		

2.3 Untersuchungsergebnisse

Wie aus Tabelle 21 hervorgeht, bestehen zwischen den Hauptbodenarten und ihrer Lösbarkeit eindeutige und auch in der Praxis leicht erkennbare Beziehungen.

Die Abrechnungsgruppe I (Tab. 21) umfaßt praktisch alle leichten bis mittelschweren Böden mit den Bodenarten: Mutterboden, Auffüllung, quartäre Kiese, tertiäre Mittelsande und tertiäre Fein-Mittelsande (2.21 - 2.24).

Der Mutterboden kann aus "ladungstechnischen" Gründen (Abschieben des Humus und Lagerung an einem besonderen Ort) als eigenständige Gruppe (Ia in Tab. 21) gewertet werden.

Die Abrechnungsgruppe II (Tab. 21) umfaßt alle Bodenarten und Gesteinsarten des Flinzmergels und der stark schluffigen Feinsande (2.25 - 2.28). Sie läßt sich unterteilen in eine Gruppe (IIa in Tab. 21), in die alle vorkommenden Bodenarten des Flinzmergels und der in ihm eingeschalteten schluffigen bis stark schluffigen Flinzsande (2.25 - 2.26) einzuordnen sind und in eine Gruppe (II b in Tab. 21), die durch den im Flinzmergel auftretenden Fels (= Mergelstein; 2.27 - 2.28) gegeben ist. Unter Fels sind alle wirklich "chemisch gebundenen", bankartigen, sog. diagenetischen Verfestigungszonen im Mergel zu verstehen, wobei für die Abrechnung wohl eine Mindestmächtigkeit und Mindestausdehnung nach Übereinkunft festzusetzen ist. Zu beachten ist, daß die Grenzen dieser Verfestigung meist unregelmäßig und nicht scharf sind (Übergänge), so daß sie sich nur selten ohne weiteres eindeutig festlegen lassen. In solchen Fällen sind zusätzliche Untersuchungen über die Festigkeit nötig (Kalkgehalt). Kalkkonkretionen, Sandstein- oder Mergelsteinknollen im Flinzmergel bedingen noch nicht die Zuordnung zur Bodenklasse Fels (2.27), da die Durchmesser dieser Einlagerungen nach den bisherigen Feststellungen unter 200 mm liegen.

Die Abrechnungsgruppe III (Tab. 21) umfaßt diagenetische Verfestigungen in Kiesen und Flinzsanden. Sie sind bisher nicht oder nur untergeordnet aufgetreten und werden wohl am besten mit der Gruppe II b der Verfestigungen im Flinzmergel zusammengefaßt (III in Tab. 22):

Tabelle 22 Die Beziehungen zwischen den einzelnen Abrechnungsgruppen und den Sedimenten

Abrechnungs- gruppen		Sedimente	
1.	I a	I	Mutterboden
2.	I b		Auffüllung, quartäre Kiese, tertiäre Mittelsande, tertiäre Fein-Mittelsande
3.	II a	II	Flinzmergel, schluffige bis stark-schluffige Flinzsande
4.	II b + (III)	III	Diagenetische Verfestigungen (Mergelstein, Sandstein, Konglomerat)

Dieses Einteilungsprinzip (Tab. 22) hat den Vorteil, daß in strittigen Fällen Korngrößenanalysen und Kalkgehaltsbestimmungen eindeutig entscheiden, zu welcher Abrechnungsgruppe die jeweilige Sedimentart gehört. Daneben ist auch eine relativ genaue Voraussage des anfallenden Erdaushubs nach Abrechnungsgruppen möglich, da die Einteilung der Schichtabfolge und den Lagerungsverhältnissen entspricht. Besonders sei hervorgehoben, daß die Grenzen der verschiedenen schwer lösbaren Böden nicht den geologisch-stratigraphischen Grenzen folgen.

Je nach den technischen Gegebenheiten und Erfordernissen können die Abrechnungsgruppen bei der Ausschreibung und bei der Abrechnung zusätzlich noch nach Teufen gestaffelt werden.

3. Fließerscheinungen in den jungtertiären Sanden

Die Fließerscheinungen natürlicher, wassergesättigter Sande und Grobschluffe (= Staubsande der geologischen Nomenklatur nach v. ENGELHARDT (FÜCHTBAUER 1959) haben nach TERZAGHI u. PECK (1961) verschiedene Ursachen. Sie können einmal durch bestimmte Materialeigenschaften, wie sie in Tabelle 23 in Spalte 2 aufgeführt sind, bedingt sein. Bei der Belastung solcher instabiler Sande bricht das Gefüge im Sediment zusammen, der Porenraum wird plötzlich verringert und der Porenwasserdruck steigt. Damit wird der Korn-zu-Korn-Druck im Sediment verkleinert und der Sand verhält sich wie eine Suspension.

Man spricht dann von einer "plötzlichen Verflüssigung" des Sediments (TERZAGHI u. PECK 1961).

Wie die Tabelle 23 zeigt, haben die tertiären Sande nicht die Eigenschaften instabiler Sande. Obwohl unsere jungtertiären Sande oft die typische Korngrößenverteilung instabiler Sande aufweisen (Abb. 26), verhindert doch der relativ niedrige Porenanteil mit der damit verbundenen hohen Lagerungsdichte ($D = 0.6$ bis 1.4) das Fließen dieser Sande auf Grund von Materialeigenschaften.

Tabelle 23 Geotechnische Kennziffern instabiler Sande im allgemeinen und der jungtertiären Sande im besonderen
[†]) Mittelwert aus nur drei Bestimmungen

Kennziffer	Instabile Sande	$S_u, \bar{s}$ (Staubsand)	fS	fS-mS	mS
wirksamer Korn-O (in mm) d_{10}	< 0.1	0.040 - 0.055	0.008 - 0.020	0.02 - 0.10	0.17 - 0.23
Ungleichförmigkeitsgrad: U	< 5	4.5 - 7.0	7 - 16	3.5-9.0	1.5-2.5
Porenanteil: (in %) n	$> 44 \%$	25.7 - 40.8	38.0 - 43.1	36.5 - 46.0	40.6 - 44.4
Mittelwerte		34.9	(41.3) [†]	41.2	42.2

Die jungtertiären Sande können jedoch, wie jedes andere Lockersediment, durch Wasserströmungen ins Fließen geraten (TERZAGHI u. PECK 1961). Dabei spielen das Raumgewicht der Sande (unter Auftrieb) und das hydraulische Gefälle eine wesentliche Rolle. Bei Erreichen des "kritischen Gefälles" hebt der Strömungsdruck das Raumgewicht des durchströmten Sedimentes auf, und der nunmehr gewichtslose Sand reagiert wie eine Flüssigkeit. Dieser Mechanismus ist weitgehend unabhängig vom Material, er wird durch das hydraulische Gefälle oder die Druckhöhe bestimmt (vgl. III, 2.22).

Da die tertiären Sandschichten und vor allem die in den Flinzmergeln eingeschalteten Sandlinsen gespanntes Grundwasser führen, ist aus diesen Gründen mit dem

Auftreten von Schwimmsanden zu rechnen, wenn solche Sande nicht entwässert oder ihr Druckwasser nicht entspannt wurde.

Diese theoretischen Überlegungen wurden durch die Befunde in den Baugruben bestätigt. Erst nach der Grundwasserabsenkung sind die nur noch bergfeuchten Sande in der Baugrube standfest. Vor der Grundwasserabsenkung stürzten jedoch unverrohrte, tiefere Bohrlöcher in Flinzsanden infolge hydraulischen Grundbruchs ein, sobald sie gespanntes Grundwasser in den tertiären Schichten anführen (vgl. III, 2.22) und wenn ohne entsprechende Wasserauflast gebohrt wurde.

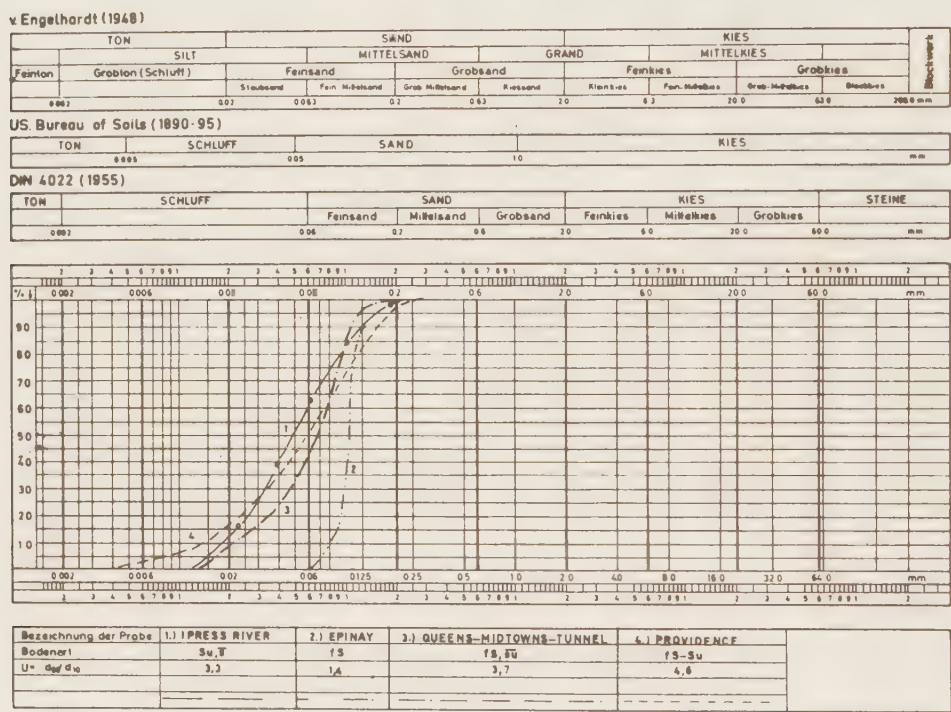


Abb. 26 Korngrößenverteilungskurven instabiler Sande nach TERZAGHI u. PECK 1961

4. Grundwasserabsenkung

Beim U-Bahn-Bau wird in den einzelnen Baulosen eine Grundwasserabsenkung durch eine geschlossene Wasserhaltung mit Gravitationsbrunnen, zum Teil auch mit Vakuumgroßbrunnen (vgl. IV, 4.5), und mit einer offenen Wasserhaltung mit Drainagen und Pumpensümpfen in den Baugruben betrieben.

4.1 Allgemeine Voraussetzungen

Nach TERZAGHI u. PECK (1961) lassen sich Lockergesteine mit einem wirksamen Korndurchmesser (d_{10}) über 0.1 mm durch Gravitationsbrunnen ⁺) gut entwässern. Die untere Grenze ist bei einem wirksamen Korndurchmesser von 0.05 mm gegeben. Bei den Bodenarten mit einem wirksamen Korndurchmesser unter 0.05 mm versagen die Grundwasserabsenkverfahren durch Gravitation, da das meiste Wasser dann in den Poren der Lockergesteine durch Kapillar- und Adsorptionskräfte festgehalten wird. Bei solchen Bodenarten (Feinsand bis Mittelschluff) empfehlen TERZAGHI u. PECK (1961) und andere Autoren das sogenannte "Vakuumverfahren". In eingespülten Vakuumlanzen oder Vakuumgroßbrunnen (vgl. IV, 4.5) wird ein Unterdruck erzeugt, so daß der atmosphärische Luftdruck das Wasser zum Filterrohr hindrückt.

Liegen die Durchlässigkeitsbeiwerte der zu entwässernden Grundwasserleiter unterhalb von 10^{-5} (m/s), so ist das Vakuumentwässerungsverfahren vorzusehen. Auch andere Autoren (ZARUBA u. MENCL 1961) wenden das Vakuumverfahren für k-Werte zwischen $k = 10^{-5}$ bis $k = 10^{-7}$ m/s an. Nach SZECHY (1963) gilt:

Gravitationsverfahren: $k = 10^{-3}$ bis 10^{-6} m/s

Vakuumverfahren: $k = 10^{-5}$ bis 10^{-7} m/s

Die Entwässerungsdauer hängt bei den Gravitationsverfahren im wesentlichen vom Feinkornanteil des Grundwasserleiters ab; die Entwässerung feinkörniger Sande dauert länger als die Entwässerung grobkörniger Schotter.

In Tabelle 24 sind die wirksamen Korndurchmesser und die k-Werte der beim U-Bahn-Bau zu entwässernden Bodenarten aufgeführt. Die k-Werte der tertiären Sedimente entsprechen den durch Laboruntersuchungen an ungestörten Bohrproben festgestellten Werten, die der quartären Schotter den Ergebnissen von Pumpversuchen.

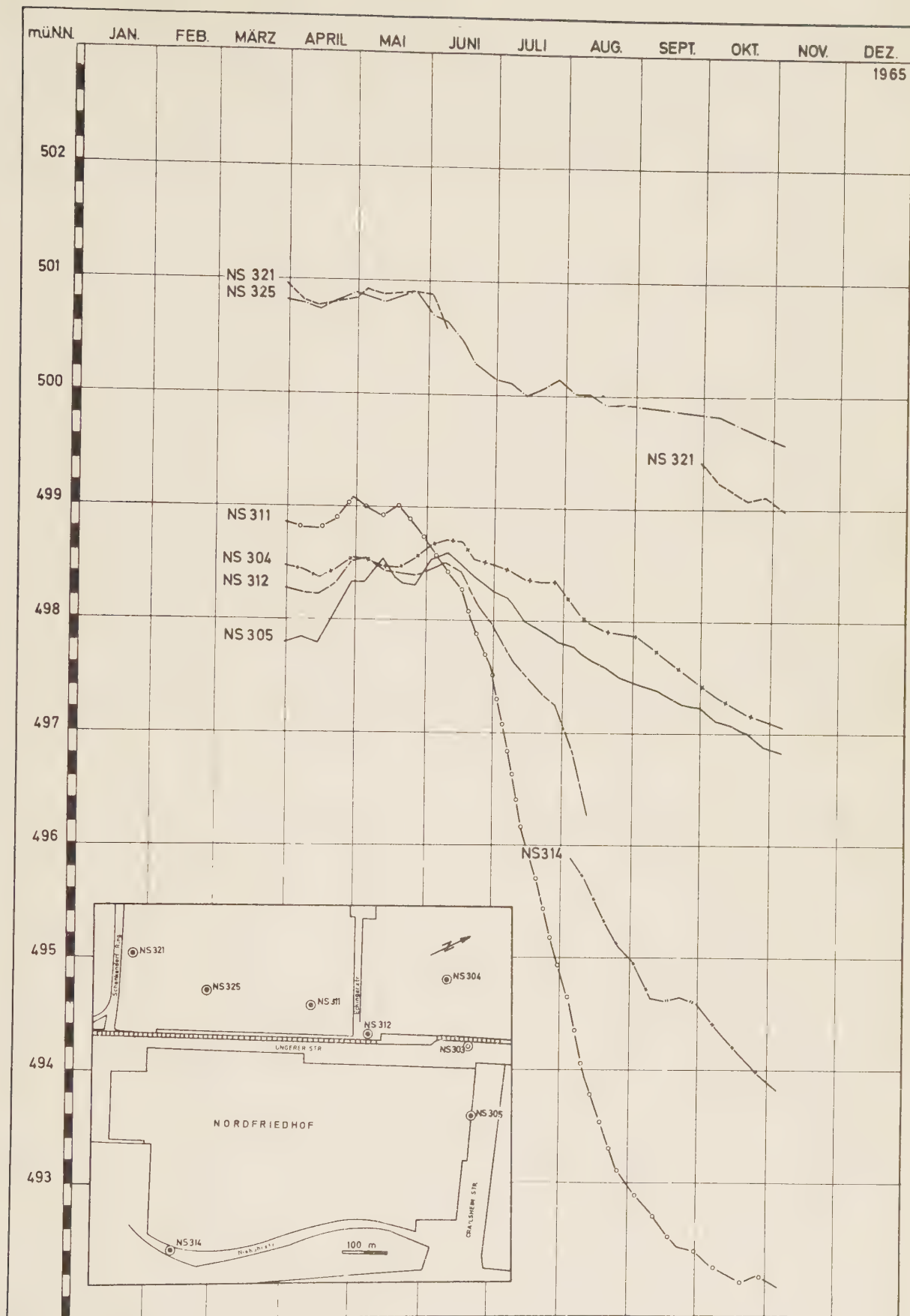
Wie die Tabelle 24 zeigt, sind die quartären Schotter ohne Schwierigkeiten durch geeignet angeordnete Gravitationsbrunnen mit Unterwasserpumpen entsprechender Leistung zu entwässern.

⁺) Normalen Brunnen fließt das Grundwasser unter der Wirkung der Schwerkraft zu, da durch die Entnahme des Wassers ein künstliches Gefälle zum Brunnen hin entsteht (Entnahmetrichter). Solche Brunnen werden nach SZECHY (1963) als "Gravitationsbrunnen" bezeichnet.

Tabelle 24 Vergleich der wirksamen Korndurchmesser und k-Werte (nach Laboruntersuchung) der zu entwässernden Bodenarten mit den in der Literatur genannten Werte dieser Kennziffern für die Entwässerung durch Gravitationsbrunnen

Kennziffern: wirksamer Korndurch- messer d_{10} und Durch- lässig- keitsbei- werte k	Entwäs- serung durch Schwer- kraft- wirkung (Litera- turan- gaben)	Tertiär			Quartär
		fS, su- $\bar{s}u$	fS-mS, su'-su	mS (fs'), su'-su	Ki,s,st
d_{10} Extrem- werte (mm) -----	> 0.05	0.008-0.02	0.02-0.08	0.17-0.23	0.2-5.5
Mittel- werte		0.01	0.06	0.20	1.00
k Extrem- werte -----	> 10^{-5}	$9.3 \cdot 10^{-7}$ $-2.5 \cdot 10^{-6}$	$2.1 \cdot 10^{-8}$ $-1.1 \cdot 10^{-5}$	$7.3 \cdot 10^{-7}$ $-4.0 \cdot 10^{-4}$	$5.0 \cdot 10^{-4}$ $-4.2 \cdot 10^{-2}$
Mittel- (m/s) werte		$1.9 \cdot 10^{-6}$	$2.9 \cdot 10^{-6}$	$2.7 \cdot 10^{-5}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$

Die tertiären Fein-Mittelsande und die Mittelsande sind nach ihren wirksamen Korndurchmessern im Vergleich zu den in der Literatur geforderten Werten gerade noch durch Verfahren zu entwässern, die auf der Schwerkraftwirkung beruhen. Diese Beurteilung besagt jedoch nicht viel, da der wirksame Korndurchmesser nur bei relativ locker gelagerten und gleichkörnigen klastischen Sedimenten ein Maß für die Durchlässigkeit und damit für die Entwässerungsfähigkeit ist. Beurteilt man die dicht gelagerten Flinsande nach den im Labor ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerten, so zeigt sich, daß diese Bodenarten gerade im Grenzbereich zwischen Gravitations- und Vakuumverfahren liegen. Da aber, wie in Abschnitt III, 3.2 dargestellt, diese k-Werte meist zu gering sind, - bei Feldversuchen wurden in der Regel höhere Werte festgestellt, - ergibt sich, daß die Tertiärsande durch die Gravitationsbrunnen noch entwässert werden können. Die Entwässerungszeiträume sind jedoch erheblich größer als die in den quartären Schottern.



Tafel 25 Grundwasserganglinien der Grundwasserpegel im Bereich des Nordfriedhofs. Nach Beginn der Grundwasserabsenkung (25. 5. 65) fallen in allen Pegeln die Grundwasserstände.

Bei der Grundwassererschließung ist man in manchen Gegenden oft gezwungen, Brunnen noch in Grundwasserleiter abzuteufen, deren Durchlässigkeiten nur bei 10^{-5} und 10^{-6} m/s liegen. Auch bei so geringen Durchlässigkeiten werden noch wasserwirtschaftlich verwendbare Wassermengen allein durch die Schwerkraftwirkung erschlossen (vgl. IV, 4.6).

Die bisherigen Erfahrungen beim Münchner U-Bahn-Bau zeigen, daß eine Wasserhaltung mit Gravitationsbrunnen in den tertiären Sanden noch befriedigende Ergebnisse erzielt. Selbst die schluffigen Feinsande ließen sich, wenn sie in die Fein-Mittelsande eingelagert waren, oder diese überlagerten (Beilage 1, I: Baulos 1), entwässern. Schwierigkeiten sind weniger durch die geringe Durchlässigkeit der Sande, sondern in manchen Fällen durch die geringen Mächtigkeiten der Sandschichten oder durch im Entwässerungsbereich liegende Stauer (Flinzmergel) bedingt (vgl. IV, 4.4). Schwierigkeiten traten auch dann auf, wenn wasserführende Feinsandschichten in den mächtigen Flinzmergeln unregelmäßig eingeschaltet sind. In solchen Fällen konnten diese meist geringmächtigen Flinzsande durch Gravitationsbrunnen, die in einem schematischen Raster angeordnet wurden, nicht alle völlig entwässert oder entspannt werden, da sie in der Regel nicht alle von Absenkbrunnen getroffen wurden.

Zusammenfassend läßt sich sagen: wenn in der Höhe der Aushubsohle der Baugruben oder Stollen und in ausreichender Mächtigkeit darunter grundwasserführende Schichten (Kiese oder Sande) anstehen, so wird die Baugrube durch die Wirkung der Gravitationsbrunnen im wesentlichen trocken gehalten. Liegt aber im Bereich der Baugrube oder dicht darunter eine undurchlässige Mergelschicht, so ist die Entwässerung meist nicht vollständig, da zwischen den einzelnen Entnahmetrichtern der Gravitationsbrunnen, nun im Bereich der Baugrube, das übliche "Restwasser" über dem Stauer erhalten bleibt, welches im ersten Fall erst unterhalb der Baugrubensohle auftreten kann. Bei offenen Baugruben wird in solchen Fällen eine offene Wasserhaltung betrieben, mit der die einströmenden Wassermengen beherrscht werden können (vgl. IV, 4). Bei Schildstrecken wird in solchen Fällen eine zusätzliche Vakuumwasserhaltung notwendig (Beilage 1, I: Baulos 6 und Baulos 9), um Erosionserscheinungen in den Tertiärsanden zu vermeiden. Auf die Wirkungsweise der Vakuumwasserhaltung wird daher erst im Anschluß an den Abschnitt IV, 4.4 "Erosionserscheinungen" gesondert eingegangen.

Bei der geschlossenen Wasserhaltung längs der U-Bahn-Baugruben und bergmännischen Stollen handelt es sich um eine echte Grundwasserabsenkung: durch Gravitationsbrunnen, die bis in die Flinzmergel reichen, wird den quartären Schottern und den tertiären Sanden der verschiedenen Grundwasserstockwerke Grundwasser entzogen und die Grundwasseroberflächen dadurch abgesenkt (Beilage 1, I und II: Baulos 1, Baulos 2; Tafel 25). Die geförderten Wassermengen erfassen anteilmäßig hohe Wassermengen aus den quartären Schottern und eine geringere Wassermenge aus den tertiären Sanden (vgl. IV, 4.6). Wegen der geotechnischen Eigenschaften der Flinzsande, besonders wegen ihrer Empfindlichkeit gegen strömendes Grundwasser, ist die Grundwasserabsenkung in den tertiären Sanden notwendig, will man Grundbrüche, Schwimmsanderscheinungen, Erosionserscheinungen u. a. vermeiden.

4.2 Anordnung und Ausbau der Gravitationsbrunnen

Eine erfolgreiche Grundwasserabsenkung setzt eine sinnvolle Anordnung der Gravitationsbrunnen voraus, deren Abstand und Ausbau den hydrogeologischen Gegebenheiten angepaßt werden. In erster Linie war Bedacht zu nehmen auf die abzusenkenden oder zu entspannenden Grundwasserstockwerke und ihre Mächtigkeiten, sowie auf die Ausbildung der verschiedenen Grundwasserleiter. Der Abstand der Gravitationsbrunnen wird bestimmt durch das Relief der Tertiäroberfläche, durch den Wasserandrang und die Mächtigkeiten der Schotter und durch die Reichweiten der Entnahmetrichter in den Schottern und in den Sanden. Darüber hinaus sind auch, wie schon erwähnt, die Lagerungsverhältnisse im tertiären Untergrund zu berücksichtigen (vgl. II, 4 und III, 4.1).

Bei der Anordnung der Gravitationsbrunnen ist daher das Tertiärrelief zu berücksichtigen. Bei Strecken, die im Schildvortrieb aufgefahren werden, werden zur genauen Feststellung der Tertiäroberkante außer den Erkundungsbohrungen noch zusätzliche Sondierbohrungen im Abstand von drei bis sechs Metern niedergebracht. Im Baulos 2 und im Baulos 6 wurde die Tertiäroberkante durch Rammsondierungen ermittelt.

Die Brunnentiefe betrug zwischen 10 und 35 m, der Brunnenabstand von der Baugrube oder von den Stollen ca. drei bis fünf Meter und der Abstand von Brunnen zu Brunnen lag je nach den örtlichen Gegebenheiten zwischen 15 und 35 m, wenn

nicht quartäre Rinnen einen anderen Abstand erforderten. Im Bahnhofsbereich (Baugrubenbreite zwischen 17 und 20 m) wurden die Brunnen beidseitig angeordnet, im Streckenbereich (Baugrubenbereich ca. ≤ 10 m) zum Teil nur auf der Seite des Grundwasserzuflusses.

Die Brunnen haben einen Durchmesser von 600 mm oder 800 mm (Tafel 35, Absenkbrunnen 25). Sie wurden mit 10 bis 15 m langen Schlitzbrückenfiltern (lichte Weite zwischen 300 und 450 mm, Schlitzweite 2 mm) und mit 2 m Sumpfrohr ausgebaut. Die Filterrohre wurden im Tertiär mit Maschengewebe (Webweite 0.63 mm) umwickelt. Die Quarzkies-Schüttung (Körnung im allgemeinen im Tertiär 1 - 2 mm; im Quartär 2 - 4 mm oder 3 - 7 mm) wurden den anstehenden Bodenarten angepaßt und reichten bis 1 m über den Ruhewasserspiegel. Die Pumpen hatten maximale Leistungen von 5.10 oder 20 l/s und waren meist erheblich gedrosselt. Da Förderhöhe über 6 m liegt, sind die Brunnen grundsätzlich mit Tauchpumpen ausgerüstet.

Die Inbetriebnahme der Brunnen erfolgte abschnittsweise mindestens eine Woche vor Beginn der Trägerbohrungen. Bis zur Erreichung des Absenkzeils dauerte es im Mittel 4 bis 12 Wochen. Dieselbe Zeit war ungefähr für die Bohr-, Aushub- und Verbauarbeiten bis zum Erreichen der Baugrubensohle erforderlich.

4.3 Einflußbereich der Absenkungen

Bei den unterschiedlichen hydrogeologischen Verhältnissen längs der Trassen sind auch die Reichweiten der Grundwasserabsenkung sehr verschieden. Grundsätzlich gilt, daß der Einfluß der Grundwasserabsenkung sich in den verschiedenen Grundwasserstockwerken je nach den Mächtigkeiten des Grundwassers, nach den Durchlässigkeiten der Grundwasserleiter, nach der Art des Grundwassers (gespannt oder ungespannt) und je nach der Druckhöhe ganz verschiedenen auswirkt.

Für das obere Grundwasserstockwerk mit ungespanntem Grundwasser in den quartären Schottern bestätigten sich die erwarteten Reichweiten, die sich auch nach den üblichen Formeln (SICHARD, FORCHHEINER, PAAVEL u.a. in BIESKE 1965 und SIEMON 1958) ergeben. Je nach Grundwassermächtigkeit, die üblicherweise zwischen 0.5 und 2 m liegt, wurden Reichweiten zwischen ≤ 10 und 100 m festgestellt. Bei hohen Grundwassermächtigkeiten in den

"Rinnen" ergaben sich Reichweiten der Absenkung bis 800 m.

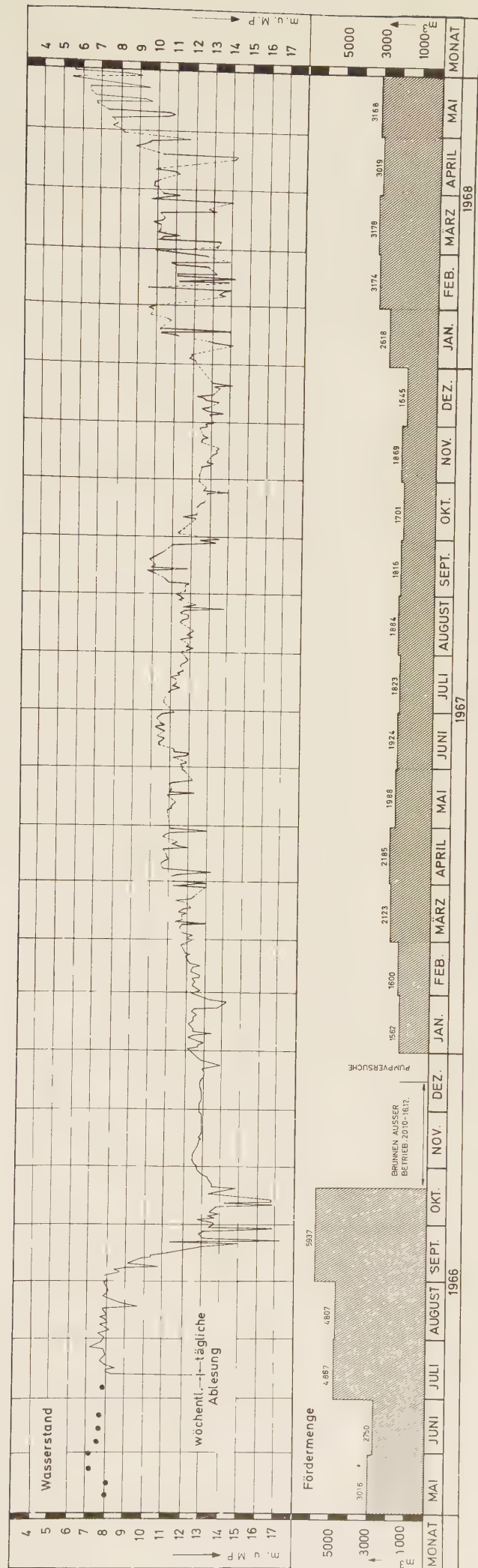
In den grundwasserführenden Tertiärsanden mit ungespanntem Grundwasser bildeten sich wesentlich steilere Entnahmetrichter aus als in den quartären Schottern. Die Reichweiten liegen hier je nach Mächtigkeit der grundwasserführenden Sande in der Regel zwischen ≤ 10 und 50 m.

Die Reichweiten der Grundwasserabsenkung bei den gespannten tieferen Grundwasserstockwerken waren in der Regel erheblich größer, wie dies mehrere Beispiele zeigen:

Im Bereich des Bauloses 6 wurde in einer Entfernung von 450 m seitlich von der Brunnengalerie der Grundwasserabsenkung, der Druckspiegel in einem 33 m tiefen Privatbrunnen noch um ca. 5 m erniedrigt.

Die Oberkante des Brunnens liegt 4.65 m unter Gelände; die maximale Pumpenleistung wurde im wasserrechtlichen Bescheid mit 4 l/s angegeben. Im Rahmen der Beweissicherungsmaßnahmen des U-Bahn-Referates wurde der Wasserstand im Brunnen ab 9.5.1966 wöchentlich und ab 11.7.1966 täglich, vor dem Einschalten des Brunnens ab Brunnenoberkante (MP) eingemessen. Die Ganglinie ist in Tafel 26 dargestellt.

Am 19./20.9.1966 förderte der Brunnen bei erheblichem Leistungsabfall stark sandiges Wasser und wurde bis zum 16.12.1966 stillgelegt. Der Brunnen förderte, nach seinem Ausbauplan zu schließen, kein Grundwasser aus den 6 bis 6.50 m mächtigen quartären Schottern. Der Grundwasserspiegel des oberen Grundwasserstockwerks liegt in dieser Gegend, wie die Grundwasserbeobachtungspegel des U-Bahn-Referats zeigten, zwischen 5.0 und 6.0 m unter Gelände. Der Brunnen dagegen wies schon am 20.3.1957 einen Grundwasserstand von 10 m unter Gelände (= 5.35 m u. MP), am 23.5.1965 von 12 m unter Gelände (= 7.35 m u. MP) auf. Da die Tertiäroberkante laut Brunnenprofil bei 6.20 m unter Gelände liegt, handelt es sich bei den Wasserständen im Brunnen um den Druckwasserspiegel einer 3 m mächtigen Tertiärsandschicht, die zwischen 26 und 29 m unter Gelände liegt. Auch die starken Absenkungen (>10 m u. MP) während der Betriebszeiten sprechen für einen Druckspiegel. Dieser Ruhwasserspiegel bei 12 m unter Gelände (= 7.35 m u. MP) entspricht in etwa dem Druckspiegel einer Flinsandschicht, wie er auch bei den Erkundungsbohrungen



Tafel 26 Ganglinie des Wasserstandes in einem Privatbrunnen (Brauchwasser). Darunter sind die Monatssummen der Fördermengen des Brunnens dargestellt.

längs der U-Bahn-Trasse festgestellt wurde.

Die im Dezember 1965 begonnene Grundwasserabsenkung des U-Bahn-Baues beeinflusst, wie Beobachtungspegel zeigten, die Grundwasseroberfläche des oberen Grundwasserstockwerks in einiger Entfernung (150 m von der Brunnengalerie) nicht mehr. Dies hängt mit der relativ geringen Grundwassermächtigkeit (0 - 1.5 m) zusammen. Da der Privatbrunnen jedoch aus diesem Grundwasserhorizont kein Wasser förderte, war dies ohne Belang.

Wie die Ganglinie des Brunnens (Tafel 26) deutlich zeigt, sank der Ruhewasserspiegel im Brunnen von ca. 12 m unter Gelände (= 12.35 - 17.35 m u. MP) und pendelte sich ab Oktober, als der Brunnen außer Betrieb gesetzt wurde, auf ca. 17.65 m unter Gelände (= 13 m u. MP) ein. Dieses Absinken auf diesen tiefen Wasserstand ist ein sicherer Hinweis, daß der Brunnen unter einer dauernden künstlichen Grundwasserabsenkung stand.

Durch die Brunnengalerie der Absenkbrunnen wurde auch die Druckhöhe des Wassers aus der Flinzsandschicht längs der U-Bahn-Trasse erniedrigt, die eine hydrologische Verbindung hat (gleicher Druckspiegel) mit der Flinzsandschicht, aus der der Privatbrunnen sein Wasser entnimmt. Diese dauernde Erniedrigung des Druckwasserspiegels wirkte sich in Anbetracht der relativ großen Druckhöhe von 8 - 11 m, der großen Mächtigkeit des Grundwasserleiters (>5 m) und der bekannten Erscheinung der raschen Druckübertragung in gespannten Grundwasserstockwerken über die Entfernung von 450 m mit einer Druckspiegelerniedrigung von ca. 5 m aus. Mit der Absenkung des Druckspiegels in dem Privatbrunnen verringerte sich auch der Wasserandrang im Brunnen (Tafel 26).

Das schlagartige Versanden des Brunnens war die Folge einer momentanen oder dauernden Überbelastung. Denn trotz der geschilderten Druckspiegelerniedrigung wurde der Brunnen mit seiner normalen Leistung gefahren und mußte daher versanden. Um eine Versandung zu vermeiden, hätte die Leistung des Brunnens nach der Druckspiegelerniedrigung erheblich verringert werden müssen. Die Förderung des Brunnens betrug unter den gegebenen Voraussetzungen nur mehr ein Drittel der ursprünglichen Leistung (Tafel 26).

Nach Beendigung der Grundwasserabsenkung im Baulos 6 traten in dem Privatbrunnen wieder die ursprünglichen Verhältnisse ein (Tafel 26).

Ein weiteres Beispiel für die großen Reichweiten der Absenkung in gespannten Grundwasserstockwerken ergab sich beim Bohren der Absenkbrunnen im Baulos 6 (Beilage 1, I). Die Absenkbrunnen, die zwischen Adalbertstraße und Georgenstraße auf einer Strecke von ca. 400 m gebohrt wurden, als die Grundwasserabsenkung am Nordende des Bauloses (Startschacht Giselastraße) und im Süden (Bahnhof Universität) schon voll in Betrieb war, wiesen nach dem Bohren zum Teil Ruhewasserspiegel zwischen 14 und 16 m unter Gelände auf. Einige dazwischen liegende Brunnen (Br. 60 u. a.) zeigten jedoch Wasserstände von 5 - 6 m unter Gelände. Die Brunnen mit dem geringen Flurabstand erfaßten Grundwasser des oberen Grundwasserstockwerks und zeigten die unbeeinflusste Grundwasseroberfläche des Grundwassers in den quartären Schottern an. Auf Grund der geringen Mächtigkeit des oberen Grundwasserstockwerks (0 - 1.5 m) in dieser Gegend, war das Grundwasser hier durch die Absenkung unbeeinflusst. Die Brunnen mit den tiefen Ruhewasserspiegeln erfaßten in den quartären Schottern kein Grundwasser, da hier der Flinzmergel das obere Grundwasser in den quartären Kiesen inselartig überragte, und zeigten daher den Druckspiegel einer tieferen Flinzsandschicht, der durch die südliche und nördliche Grundwasserabsenkung schon um ca. 5 m tiefer gelegt worden war.

Auch der Pegel NS 314, der im Baulos 1 ca. 450 m westlich der Trasse entfernt liegt (Tafel 24), zeigt wie eine Grundwasserabsenkung einen Druckspiegel über weite Bereiche erniedrigt. Seine Ganglinie ist in Tafel 25 eingezeichnet und zeigt eine Wasserspiegelniedrigung durch die Grundwasserabsenkung im Baulos 1 und 2 von ca. 3 m. Der Pegel durchteuft kein Grundwasser in den quartären Schottern und der 0.80 m mächtige, tertiäre Grundwasserleiter, der vom Pegel durchstoßen wird, führt gespanntes Grundwasser.

Am deutlichsten ließ sich die Reichweite der Grundwasserabsenkung in den tieferen Grundwasserstockwerken zwischen Marienplatz und Karlsplatz nachweisen: hier konnte in den Mehrfachpegeln der S-Bahn entlang der Kaufinger-Neuhauser-Straße die Auswirkung der Grundwasserabsenkung am Marienplatz (Baulos 10, Baulos 9 und Baulos 15) beobachtet werden.

Die Absenkung von ca. 20 m am Marienplatz wirkte sich im zweiten Grundwasserstockwerk noch in 538 m Entfernung, am Karlstor, mit einer Druckspiegelniedrigung von 9 m aus (Abb. 27). Ein Tiefenpegel der Bayerischen Landes-

stelle für Gewässerkunde, München, im Englischen Garten, in dem der Druckspiegel des dortigen zweiten Grundwasserstockwerkes beobachtet wird, wurde durch die tiefe Absenkung am Marienplatz (Entfernung ca. 1200 m) noch deutlich beeinflußt. Der Druckspiegel des Pegels E 1 in der Nähe des Hauses der Kunst fiel seit Februar 1967 ständig von 505.59 m NN bis auf 502.0 m NN am 13.11.1967. Die wesentlich früher begonnenen Grundwasserabsenkungen in den näher gelegenen Baugruben 6 und 7 (ca. 400 m) beeinträchtigten dieses tiefere Grundwasserstockwerk ebensowenig, wie Pumpversuche am Prinz-Karl-Palais, da der Druckspiegel, der im Pegel E 1 beobachtet wird, zu zwei Sandschichten gehört, die in ca. 15.5 und 26.0 m unter Gelände anstehen (Tafel 23).

Aus diesen Tatsachen darf wohl mit Recht der Schluß gezogen werden, daß bei einer geologischen Schichtfolge: grundwasserführende Kiese, mindestens 3-5 m mächtige Flinzmergel und darunter über 5 m mächtige grundwasserführende Flinzsande, - und bei einer geeigneten, diesen Verhältnissen angepaßten Tiefenlage der Schildtunnel (2-3 m Mergel über der Firste), - die Grundwasserabsenkmaßnahmen auf das untere Grundwasserstockwerk (gespanntes Grundwasser) beschränkt werden können (Absenkbrunnen mit Dichtungen gegen den Mergel) und, daß dann das unbeeinflusste obere Grundwasserstockwerk im Schildvortrieb unterfahren werden kann.

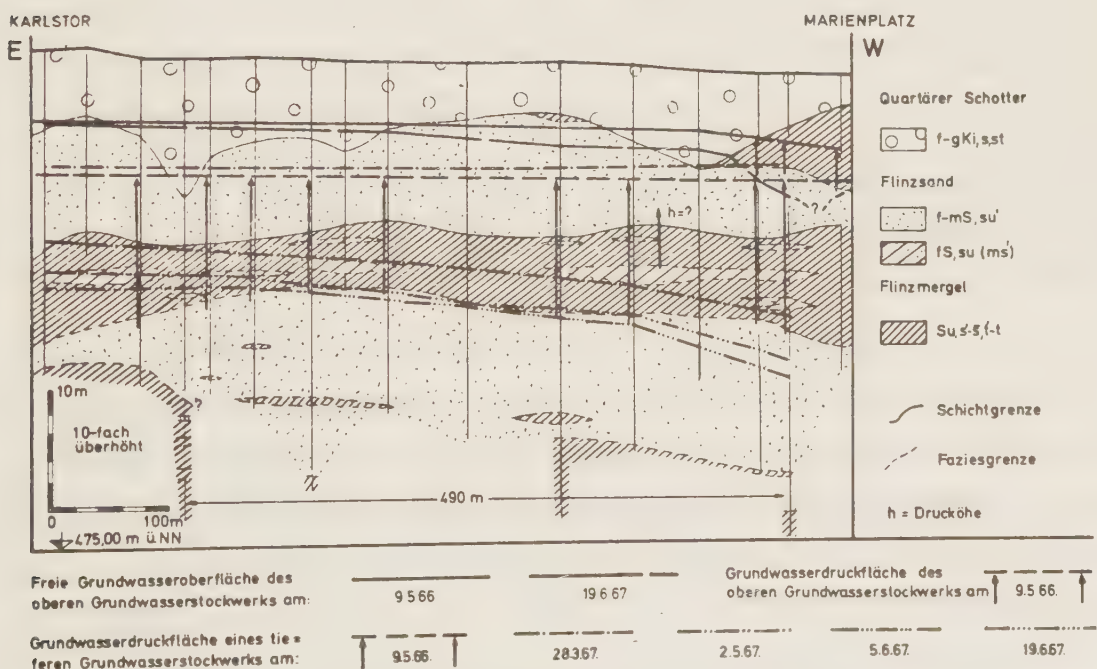


Abb. 27 Druckspiegelniedrigung eines tieferen Grundwasserstockwerks durch die Grundwasserabsenkung im Bereich des Marienplatzes

4.4 Setzungserscheinungen

Durch eine Absenkung des Grundwasserspiegels wird die effektive Belastung im Boden vergrößert. Sie entspricht der Differenz zwischen dem Feuchtraumgewicht und dem "Unter-Wasser-Gewicht" derjenigen Bodenmasse, die sich zwischen dem ursprünglichen und dem abgesenkten Wasserspiegel befindet (TERZAGHI u. PECK 1961).

Diese Gewichtszunahme kann theoretisch je nach Bodenart bei Sanden, Schluffen oder Tonen eine zusätzliche Verdichtung des Materials und damit eine Setzung des Bodens herbeiführen. Die Frage, ob durch die vorübergehende Grundwasserabsenkung des U-Bahn-Baues eine Bodensetzung aus diesen Gründen auftreten könnte, wurde daher schon frühzeitig diskutiert.

Für Sande ist hierbei ihre Lagerungsdichte von entscheidender Bedeutung. Je lockerer der Sand, desto größer ist seine Setzung bei einer Grundwasserabsenkung. Bei dichtgelagerten Sanden, wie es die Münchner Flinzsande sind ($D = 0.59 - 1.36$) erfüllt das Grundwasser praktisch nur den Porenraum, ohne an der Druckübertragung teilzunehmen. Es sind hier nur geringfügige Setzungsbeträge nachweisbar.

Bei Tonen oder Schluffen führt ihre Entwässerung zu einer Erhöhung des effektiven Druckes im Boden, die der Differenz des ursprünglichen und des abgesenkten Wasserspiegels entspricht. Diese Vergrößerung kann zur Konsolidierung des Bodens und damit zu Setzungen führen (TERZAGHI u. PECK 1961).

Um die Möglichkeiten solcher Setzungserscheinungen zu untersuchen, wurde im Baulos 2 ein Feldversuch durchgeführt, der in Abbildung 28 und Tabelle 25 dargestellt ist: senkrecht zur Trasse wurde bei km 4.40 + 46.14 m ein Meßprofil aufgebaut; mit ihm sollten etwaige Setzungen erfaßt werden. Zu diesem Zweck wurden im Abstand von 5.7 m, 12.3 m, 34.1 m und 59.0 m von der Baugrube vier Höhenfestpunkte gebaut, deren Betonfundamente 1.50 m tief in den Boden reichten. Zwischen den Meßpunkten wurden dann Grundwasserbeobachtungspegel abgeteuft (Abb. 27). Die Ergebnisse des Feinnivellements der Festpunkte und die Beobachtung der Grundwasserstände in den Pegeln sind in der Abbildung 27 und in der Tabelle 25 aufgeführt. Nach einer fast dreimonatigen Beobachtung ergaben sich Setzungsbeträge, je nach Entfernung von der Baugrube zwischen

0.0 und 12.0 mm. In diesem Zusammenhang wurden an Gebäuden Setzungen bis zu 5 mm festgestellt; Gebäudeschäden traten nicht auf.

In diesem Zusammenhang sei auch darauf hingewiesen, daß die Überprüfungen der Höhenbolzen des städtischen Höhennetzes außerhalb des engeren Baugrubenbereichs keine durch die Grundwasserabsenkungen bedingten Setzungen zeigte.

Tabelle 25 Setzungsbeträge und Absenkungen längs des Meßprofils bei km 4.4 + 46.14 m

Höhenbolzen	Entfernung von der Baugrube (m)	Datum	Höhe in m NN	Setzungsbetrag (mm)	Absenkung im Pegel (m)
1	5.7	24.5.65	505.677	12	> 14 (T 316)
		19.8.65	505.665		
2	12.3	24.5.65	505.677	10	> 9 (NS 328)
		19.8.65	505.667		
3	34.1	24.5.65	505.673	6	> 6 (NS 327)
		19.8.65	505.667		
4	59.0	24.5.65	505.583	0	> 3 (NS 326)
		19.8.65	505.583		

Auch beim Schildvortrieb treten Setzungen auf. Sie sind jedoch nicht durch die Grundwasserabsenkung, sondern durch die beim Auffahren der Stollen auftretende Entspannung des Gebirges bedingt.

Im Baulos 6 wurde, um diese Setzungen zu kontrollieren, ein Raster von Höhenmeßpunkten im Abstand von ca. 25 m längs der Tunnelstrecken eingerichtet und beobachtet. Die Setzungen über den Schildachsen lagen in der Regel zwischen 5 und 18 mm, das Maximum beim Tunnel 1 bei 24 mm. Seitlich der Tunnelröhren wurden im Abstand von ca. 30 m Setzungsbeträge zwischen 0 und 3 mm und ein maximaler Wert von 10 mm festgestellt. In 60 m Entfernung von der Schildachse waren praktisch keine Setzungen mehr nachzuweisen.

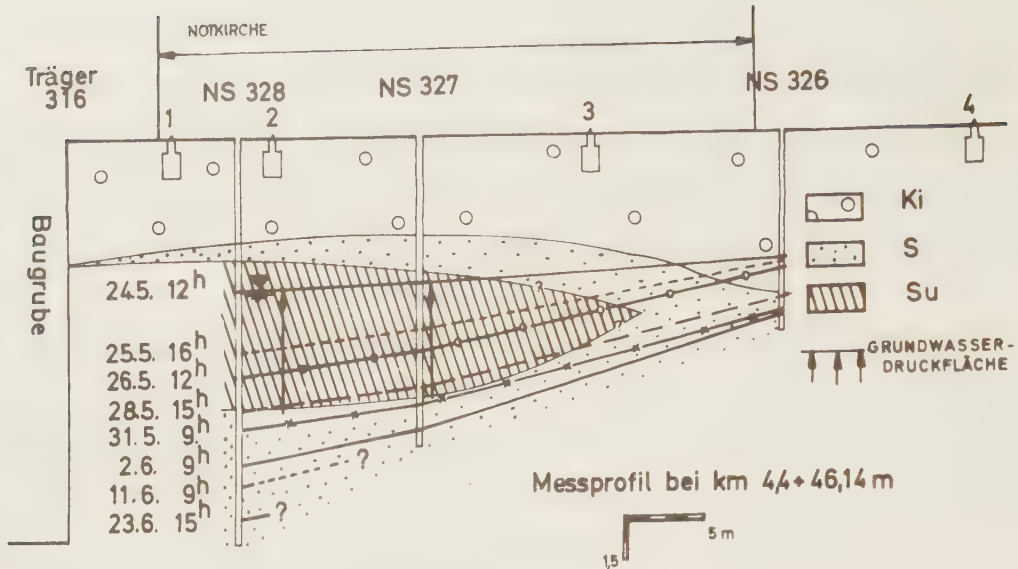


Abb. 28 Anordnung der Höhenbolzen (1,2,3 und 4) und der Grundwasserpegel im Meßquerschnitt (Baulos 2)

Für das Siegestor ergaben sich bei der ersten Unterfahrung Setzungen zwischen 6 und 11 mm; bei der zweiten Unterfahrung zwischen 5 und 11 mm; insgesamt bedingten beide Unterfahrungen Setzungsbeträge bis 20 mm.

4.5 Erosionserscheinungen

Als "Restwasser" bezeichnen wir das Grundwasser, das trotz der normalen Grundwasserabsenkung durch Gravitationsbrunnen nach Erreichen des Beharungszustandes zwischen den einzelnen Brunnen im Grundwasserleiter verbleibt. Restwasser bleibt im allgemeinen nur zurück, wenn ein Wasserstauer (Flinzmergel) im Bereich der zu entwässernden Bodenschichten ausgebildet ist, d.h. wenn ein oder mehrere undurchlässige Schichten noch über dem theoretischen Absenkziel liegen (Tafeln 28 und 29).

Diese Restwässer führen unter der Vorflutwirkung einer Baugrube oder eines noch ungedichteten Tunnels zu Erosionserscheinungen in Tertiärsanden: durch solche inneren Erosionen können, sofern nicht rechtzeitig geeignete Maßnahmen getroffen werden, örtliche "absackungsartige" Setzungen entstehen, die in ihren Größenordnungen erheblich über den durch die allgemeine Grundwasserabsenkung bedingten Setzungen liegen (vgl. IV, 4.4). Es bilden sich mehr oder weniger große Erosionskavernen, von den Bauarbeitern auch "Fuchsbaue" genannt, die im allgemeinen an der Grenze Flinzsand/Flinzmergel durch Ausspülung und

Nachbrechen des Sandes entstehen (Tafeln 27 und 30). Eine Ausnahme hinsichtlich der Lage bilden Erosionskavernen, die durch Durchbrüche von schon im Schildvortrieb unterfahrenen Restwässern aus dem Hangenden im Bereich der Firste des Stollens (Tafel 28, Tunnel 1) entstehen.

Solche Erosionserscheinungen sind nach den bisherigen Erfahrungen z.T. harmlos, z.T. aber so bedenklich, daß Sondermaßnahmen erforderlich werden. Die Größe der Erosionskavernen und damit das Ausmaß der inneren Erosion hängt ab vom hydraulischen Gefälle, das bedingt wird durch die Höhe des Grundwasserstandes über dem im Baubereich liegenden Stauer, von der Menge des zur Baugrube dringenden Wassers, die von der Durchlässigkeit des Grundwasserleiters und dem Grundwasserstand über dem Stauer und von den Vorflutverhältnissen, d.h. von den Eintrittsquerschnitten (Schildtunnel oder offene Baugrube) abhängt.

4.51 Restwasser in den quartären Kiesen

4.511 Erosionserscheinungen bei offener Bauweise

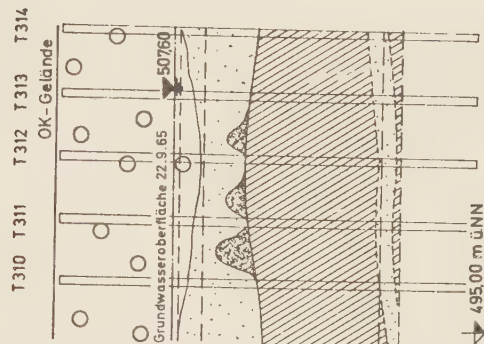
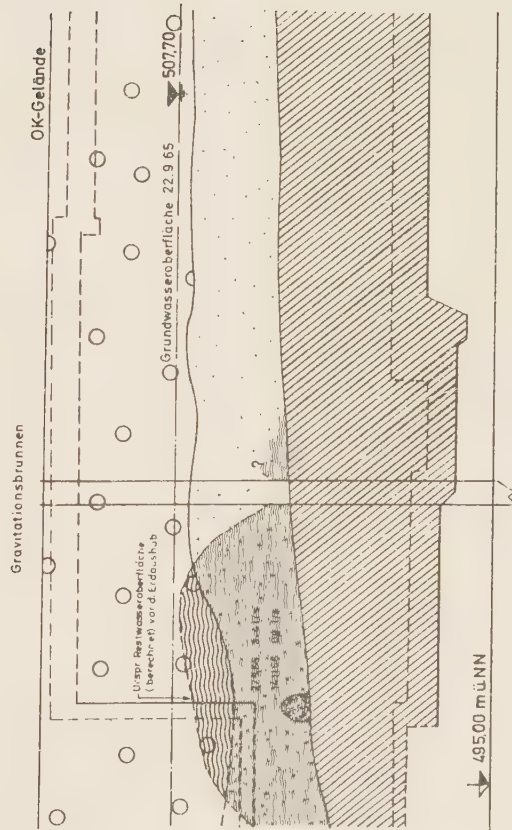
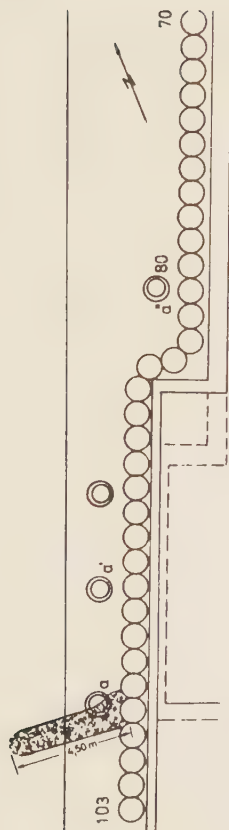
Restwässer im Quartär führen hier nur dann zu Erosionserscheinungen, wenn unmittelbar unter dem Quartärkies Tertiärsande folgen, die erodiert werden können.

Bleiben über einem Flinzsandpaket in quartären Kiesrinnen Restmengen des Grundwassers trotz der Grundwasserabsenkung stehen, so wird dieses Wasser zunächst bis zur Freilegung der Tertiäroberkante oberhalb der Tertiärsande in die Baugrube einfließen. Dieser Eintritt des Grundwassers geschieht nur kurze Zeit gleichmäßig über das Profil der anstehenden Kiese. Mit zunehmender Vertiefung der Baugrube konzentriert sich das zusickernde Grundwasser an einigen wenigen Quellorten in Abhängigkeit vom Relief der Tertiäroberkante oder von künstlichen Eingriffen (Bohrung, Ausschachtung). Unter der Vorflutwirkung der Baugrube geht vom Quellmund die rückschreitende Erosion in die Flinzsande hinein. Wo früher das Grundwasser diskret über den ganzen Porenraum floß, bilden sich nun örtlich Wasserschläuche oder höhlenartige Abflußwege im Flinzsand zum künstlich geschaffenen Vorfluter.

Im Bereich des Bauloses 6 konnte die Grenze der ohne Bauschäden noch vertretbaren Erosionserscheinungen festgestellt werden. Hinter der Bohrpfahlwand

im Südkopf des Bahnhofs Universität und zwischen den Trägern 309 und 314 des Bahnhofs Universität (Westwand) wurden die entstehenden Erosionserscheinungen aufgemessen; sie sind in der Tafel 27 dargestellt. Wie die Aufnahme der Tertiäroberkante in der Baugrube ergab, entstanden Erosionskavernen dort, wo der Quartärkies sich mehr oder weniger in das Tertiär eintieft. Da im Bereich der offenen Baugruben die Absenkbrunnen schematisch angeordnet wurden, trafen sie manchmal nicht in die Tiefstpunkte des Tertiärreliefs. Dies führte dann zu den beschriebenen Erosionserscheinungen. Die eindringenden Wassermengen an der Bohrpfahlwand betrugen zwischen dem 24.8.1966 und dem 27.9.1966 ca. 3 - 4 l/s. Die größten festgestellten Kavernen hatten einen Rauminhalt zwischen 4.6 und 6.5 m³.

In frühen Stadien, wenn die Baugrube nur wenig tiefer als die Tertiäroberkante ist, kann diese innere Erosion mit gezielt gebohrten Brunnen, die das Quartär entwässern, verhindert werden (Tafel 27: Brunnen a, a', a''). Das Wasser später aus den Erosionsschläuchen im Tertiärsand durch Brunnen zu fördern, ist praktisch unmöglich: einmal ist es Zufall, wenn eine Bohrung solche unregelmäßig ausgebildeten Erosionswege trifft und zum anderen wird durch den Filtereintrittswiderstand am Brunnen die Strömungsgeschwindigkeit des erodierenden Wassers zum Brunnen hin stark verringert. Dadurch setzt sich am Filter die mechanische Fracht ab, das Wasser wird kurzfristig aufgestaut, bis es sich neue Erosionswege seitlich des Brunnens freispült, ohne daß der Brunnen nennenswerte Wassermengen fördert. Aus diesem Grunde ist auch ein teilweiser, dichter Verbau oder ein Ausbau von der Baugrube her mit Filterkies und Gewebe (teilweises Aufheben der Vorflutwirkung), sofern er nicht auf der ganzen Baugrubenlänge zwischen den nächstgelegenen Absenkbrunnen erfolgt, wirkungslos. Im Gegenteil: die ursprünglich auf verhältnismäßig engem Raum lokalisierten Erosionserscheinungen breiten sich dadurch nur weiter aus, weil sich das Wasser immer neue Wege sucht. So wurden nach solchen Maßnahmen am 11.11.1966 zwischen dem Bohrpfahl 103 und dem Bohrpfahl 57 elf größere erodierende Restwassereintrittsstellen festgestellt, wobei die meßbaren Wassermengen zwischen 0.01 und 0.8 l/s, die Gesamtmenge 2.4 l/s betrugen. Die ausgespülten Sandmengen wurden mit 0.1 - 1 cm³/l gemessen, die Maxima kurz nach dem Durchbruch des Wassers in der Baugrube lagen bei 15 cm³/l. An der



- f-gKl, sst Quartär-schotter
- fS, f-mS, mS Flinzsand
- Su, s-s, t-t Flinzmangel
- Schichtgrenze (Erosionsdiskordanz)
- Faziesgrenze
- Erosionskaverne
- Bauwerk
- Gravitationsbrunnen
- Bohrpfahl 103
- Träger 309

Tafel 27 Erosionserscheinungen im Flinzsand im Bereich des Bauloses 6, Bahnhof Universität

Oberfläche ergaben sich bis zu diesem Zeitpunkt an dem darüberliegenden Gebäude Setzungen bis zu 8 mm.

Es mußten also wirksame Hilfsmaßnahmen gegen eine weitere innere Erosion mit ihren Folgen getroffen werden, und zwar wurde das eindringende Wasser durch Plastikschläuche an der Grenze Flinzsand/Flinzmergel (Stauer-Oberkante) zwischen den Bohrpfählen gefaßt und senkrecht nach unten in die Drainage des Bauwerks abgeleitet. Die Hohlräume selbst wurden verpreßt und die gesamte Baugrubenwand an den gefährdeten Stellen zwischen den Absenkbrunnen gedichtet. Dadurch wurde die Vorflutwirkung aufgehoben, das Wasser staute sich bis zu einer bestimmten Höhe auf und wurde dann unabhängig vom Tertiärrelief von den nächstgelegenen Brunnen erfaßt, wobei dann auch die nachgebohrten Brunnen (a, a', a'') wirksam wurden. Erst zu einem späteren Zeitpunkt, als die südliche Brillenwand (= betonierte Stirnwand mit zwei runden, verbohlten Öffnungen für den Schildvortrieb der Tunnel 3 und 4) fertiggestellt war, führte die beschriebene Vorflutwirkung der Baugrube an dem nur verbohlten westlichen Brillenloch erneut zu Wassereintritten, die im Juli 1967 zwischen 0.85 und 1.5 l/s schwankten. Hinter der Verbohlung entstanden an der Grenze Flinzsand/Flinzmergel Erosionskavernen. Die Brillenwand wurde im Bereich dieser Grenze geöffnet, das Wasser gefaßt und die Hohlräume verpreßt. Nach Setzungsprotokollen der Arge des Bauloses 6 sind an dem Gebäude über der Bohrpfahlwand nach diesen Maßnahmen (nach dem 16.5.1967) keine weiteren Setzungen mehr nachweisbar.

4.512 Erosionserscheinungen beim Schildvortrieb

Im Baulos 6 im Bereich der ersten Tunnelstrecke stehen unter einer 4 - 7 m mächtigen Quartärkiesüberdeckung folgende Tertiärsedimente in verschiedener Ausbildung und Mächtigkeit an:

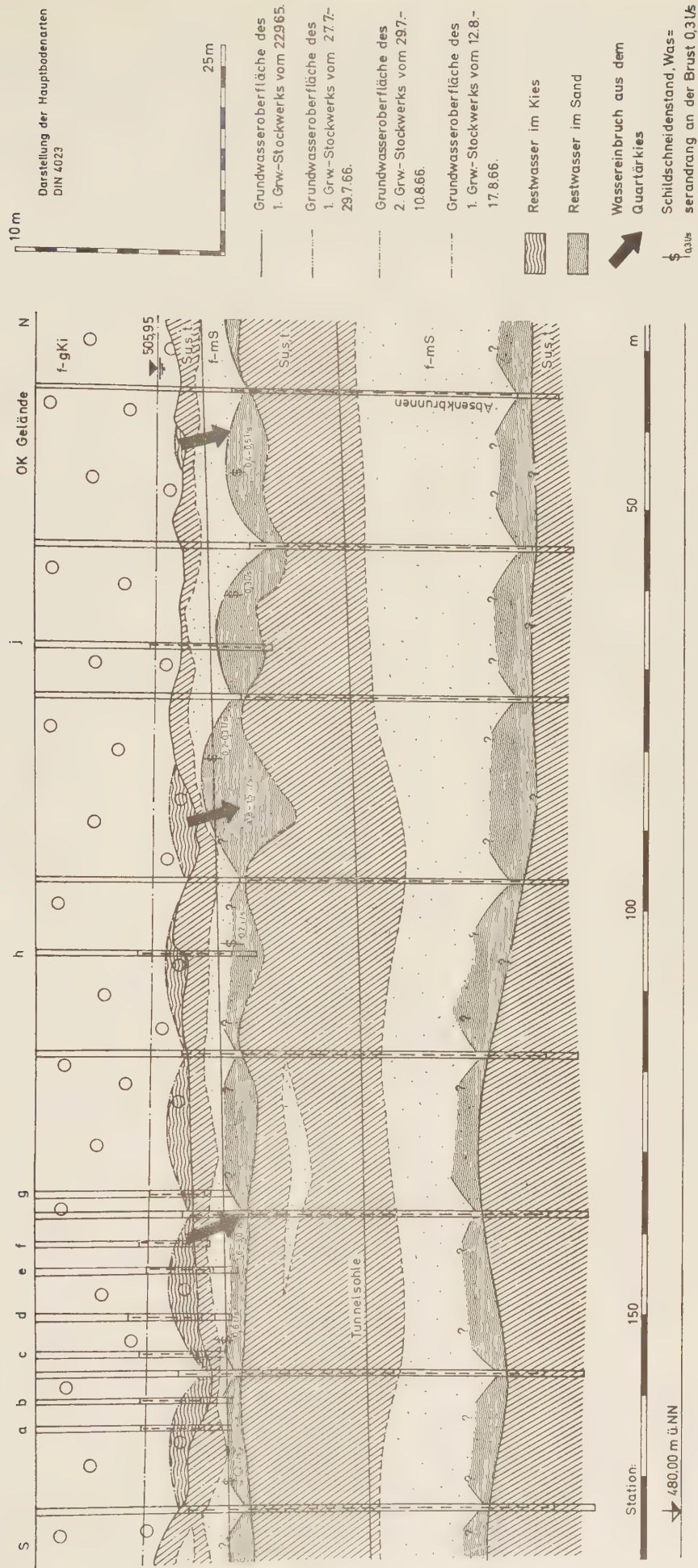
Von oben nach unten:	0.0 - 3.0 m Flinzmergel	} vgl. Tafel 28 (Baulos 6, Tunnel 1)
	0.5 - 3.5 m Flinzsand	
	3.0 - 7.0 m Flinzmergel	
	4.5 - 9.0 m Flinzsand	
	> 2.0 m Flinzmergel	

Die Oberkante des untersten Flinzmergelpaketes ist nach den Bohrangaben der im Spülverfahren gebohrten Absenkbrunnen gezeichnet. Wie die bisherigen

Erfahrungen zeigten, sind Spülbohrungen meist sehr ungenau; die obere Grenze des untersten Tertiärmergels ist daher in ihrer Teufenlage unsicher.

In den quartären Kiesen lag ein meist nur geringmächtiges, oberes Grundwasserstockwerk mit freier Oberfläche (Tafel 28: Grundwasseroberfläche vom 22.9.1965). Die beiden Flinzsandpakete führten, wie Beobachtungen außerhalb des Profilbereichs zeigen, gespanntes Grundwasser mit voneinander abweichenden Druckwasserspiegeln. Mit schematisch angeordneten Filterbrunnen (Abstand ca. 20 m, Teufe 22 - 25 m) wurde das obere Grundwasserstockwerk um 0.50 bis 1.50 m abgesenkt (Tafel 28). In Rinnen, die durch den unregelmäßigen Verlauf der Flinzmergeloberfläche bedingt sind und die erst später durch Sondierbohrungen (Abstand 3 - 5 m) gefunden wurden, wurde das Grundwasser stellenweise nur wenig abgesenkt. Diese Sondierbohrungen wurden, soweit sie Grundwasser antrafen, mit Pegelrohren ausgerüstet. Nach ihren Beobachtungsergebnissen wurden die Oberflächen des Restgrundwassers vor Beginn der Hilfsmaßnahmen in der Tafel 28 dargestellt (Grundwasseroberflächen vom 27./29.7.1967 und vom 29.7./10.8.1967). Sie entsprechen einem Beharrungszustand der schematisch angeordneten Grundwasserabsenkbunnen. Das untere Grundwasserstockwerk wurde erheblich abgesenkt, so daß sein Restwasserspiegel unterhalb der Tunnelsohle lag. Das mittlere Grundwasserstockwerk konnte infolge der schwankenden und geringen Mächtigkeit des Grundwasserleiters praktisch nur entspannt werden (Tafel 28). Die aus diesem Horizont anfallenden Grundwassermengen waren aber so gering, daß sie den Schildvortrieb nur wenig beeinträchtigten. Vor allem konnte mit einer erhöhten Vortriebsgeschwindigkeit und einem dauernden Vortrieb die Entstehung von Erosionskavernen an der Brust verhindert werden.

Bei der Station 40/50 (m vom Startschacht aus), bei 96 und 140/170 brach das in Quartärrinnen fließende restliche Grundwasser zum Schild durch. Die Flinzmergelüberdeckung über der Firste war hier zum Teil nur noch 0.40 m mächtig. Unter der Vorflutwirkung des Tunnels drang das Wasser rasch in das mittlere Flinzsandpaket ein und führte dort zu den beschriebenen Erosionserscheinungen. Hier liegt ein wesentlicher Unterschied zu den Erosionserscheinungen in der offenen Baugrube: durch die beim Schildvortrieb möglichen Einbrüche an der Firste sind auch innere Erosionen in tieferen (noch im Tunnelbereich liegenden), vom Flinzmergel überdeckten, Tertiärsanden möglich.



Tafel 28 Hydrogeologisches Profil im Bereich des Tunnel 1 im Baulos 6 (Ausschnitt)

Solche erodierenden Wässer führten, mit dem Absetztrichter gemessen, bis zu 85 - 150 cm³/l Sand. Übertage traten lokale Setzungen in Ausdehnungen von einem Quadratmeter auf. Im Tunnel selbst wurden eingeschwemmte Quartärkiesgerölle gefunden. Die eindringenden Grundwassermengen waren erheblich größer als jene Mengen, die normalerweise im Porenraum der Flinzsande enthalten sind. Zeitweise wurden Mengen zwischen 1.5 und 3.0 l/s gemessen.

Erst nachdem im Quartärkies weitere Absenkbrunnen gesetzt wurden (Tafel 28, a bis j), die dort standen, wo die Sondierungen Eintiefungen des Quartärs feststellten, gingen die Wassereintritte zurück. Diese Brunnen schafften umso leichter eine Abhilfe, da seitlich des Tunnels die geringmächtige, aber doch undurchlässige Flinzmergelüberdeckung unter dem Quartärkies erhalten war. Die entstandenen Hohlräume im Bereich des Tunnels wurden z.T. vom Schild aus und z.T. von übertage aus verpreßt.

Um solche Wassereinbrüche zu vermeiden, ergab sich die Notwendigkeit, die Absenkbrunnen so anzuordnen, daß sie in den Tiefpunkten des Tertiärreliefs stehen (vgl. IV, 4.2). Dieses Problem wurde durch die engen Sondierbohrungen im Bereich der Schildstrecken gelöst. Grundsätzlich gilt, daß der Tunnel möglichst tief unter der Tertiäroberkante liegen soll (auch entwässerte Quartärinnen erschweren den Vortrieb) und vor allem soll über der Firste eine mindestens 1 - 2 m mächtige Flinzmergelüberdeckung liegen, damit evtl. Restwässer unterfahren werden können. Auf Grund dieser Überlegungen wurde die Tunnelröhre 2 im Baulos 6 maximal bis zu 3 m tiefer gelegt, eine Maßnahme, die sich voll bewährt hat.

Die bisher beschriebenen Erosionserscheinungen lassen sich nicht aus der Grundwasserführung der Flinzsande erklären, obwohl beim Baulos 6 auch gewisse Restwassermengen aus den Tertiärsanden beteiligt sind (Tafel 28), sondern sie sind bedingt durch die Restwässer in den quartären Schottern.

4.52 Restwässer in den jungtertiären Sanden

4.521 Erosionserscheinungen bei offener Bauweise

Selbstverständlich wurden auch Restwässer in den jungtertiären Sanden festgestellt (Baulose 6, 7, 9, 13 und 4). Die in die Baugrube eindringenden Wassermengen sind jedoch dann im allgemeinen erheblich geringer als die Restwässer

aus dem Quartärkies. Die hierbei beobachteten Erosionskavernen an der Grenze Flinzsand/Flinzmergel (Tafel 27) verteilten sich über die ganze Länge und Breite der Baugruben, d.h. bei den meist 16 m breiten und über 100 m langen Baugruben im Bereich der Bahnhöfe stand für eine relativ geringe Wassermenge eine große Eintrittsfläche zur Verfügung. Es entstanden in Abhängigkeit vom Relief des Stauers in diesem Fall zahlreiche kleinere und daher meist harmlose Erosionskavernen (Abb. 29). In diesen Fällen konnte das Restwasser

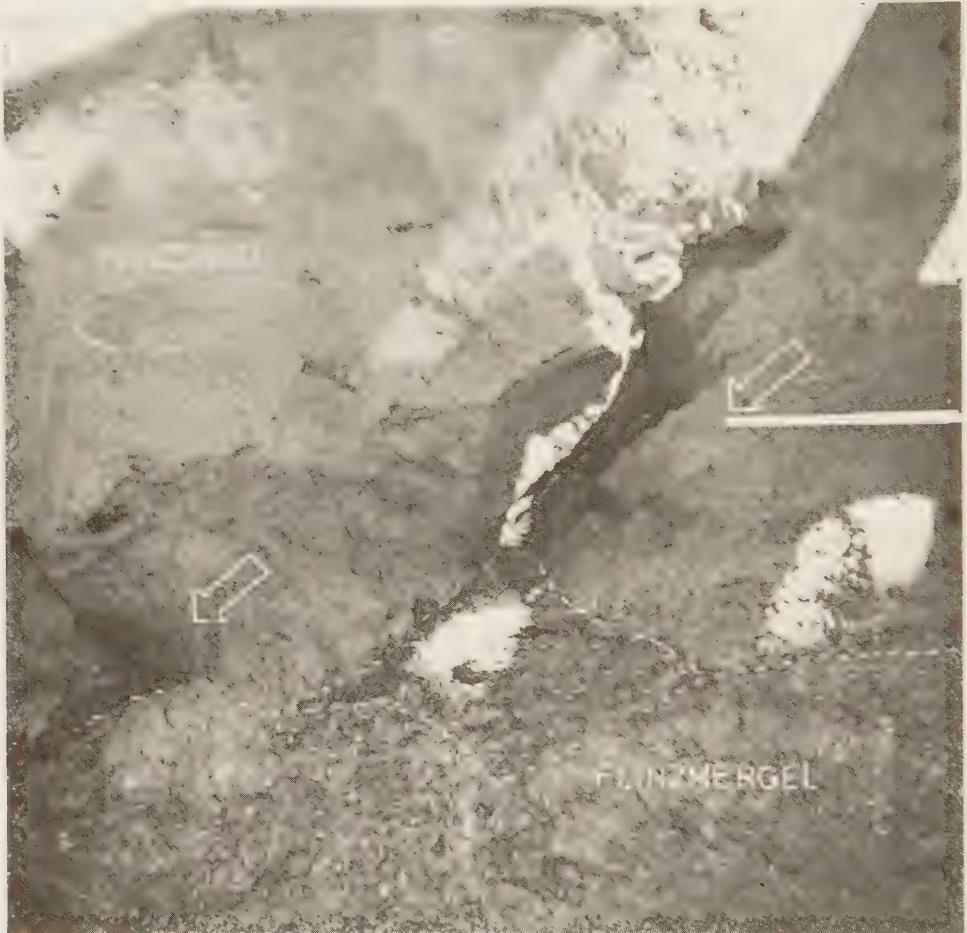


Abb. 29 Erosionskavernen im Flinzsand im Bereich des Bauloses 7 (Bhf. Odeonsplatz)

ohne besondere Maßnahmen in die offene Wasserhaltung eingeleitet werden. Nur dort, wo der Baugrubenquerschnitt relativ gering ist (Baulos 13, Abzweigung zur Olympiastraße) oder dort, wo große Reliefunterschiede des Stauers auf engem Raum zu finden waren (Baulos 7, kurz vor der westlichen Bohrpfahlwand am Nordkopf), waren größere Kavernen nachweisbar. Hier wurde kurz nach dem Auftreten der Erosionskavernen durch die schon in Abschnitt IV, 4.511

beschriebenen Maßnahmen Abhilfe geschaffen. Es wurden keine Setzungen im Bereich dieser Kavernen festgestellt.

Ein Sonderfall war noch im Baulos 4 gegeben, wo über einem Stauer in der Baugrube grobkörnige Aufarbeitungslagen und Quarzkieslinsen aufgeschlossen waren (Beilage 1, I). Die höheren Durchlässigkeiten dieser Lagen im Niveau des Restwassers hatte natürlich eine entsprechend große, aus dem Tertiär stammende, Restwassermenge zur Folge. Es ist das einzige Baulos, in dem die Wassermengen der offenen Wasserhaltung die der Absenkbrunnen übertreffen (vgl. IV, 4.73).

Der Eintritt des Restwassers war überwiegend an die wegsameren Kieslagen gebunden. So wurden diese im Lauf der Zeit zwar fast sandfrei gespült, es kam jedoch nicht zur Bildung von Erosionskavernen, da das Stützgerüst des Quarzkieses die Entstehung von Hohlräumen verhinderte. Das eindringende Wasser wurde ohne Schwierigkeit in den Seitendrainagen des Bauwerks gefaßt, in Pumpsümpfen gesammelt und von dort abgeleitet.

4.522 Erosionserscheinungen beim Schildvortrieb

Die Wirkung des Restwassers in tertiären Sanden und die entsprechenden Gegenmaßnahmen lassen sich am Beispiel des Tunnel 3 (Tafel 29, 30 und 31) aufzeigen:

Hier steht unter 3.5 - 8 m mächtigen Quartärkiesen ein ca. 4 - 7.5 m mächtiger, mittelkörniger Flinzsand an. Darunter folgt eine durch Bohrungen nicht durchteufte Flinzmergelschicht, die mehrere Feinsandlinsen führt und deren Oberkante etwa im Bereich der Schildachse liegt (Tafel 29).

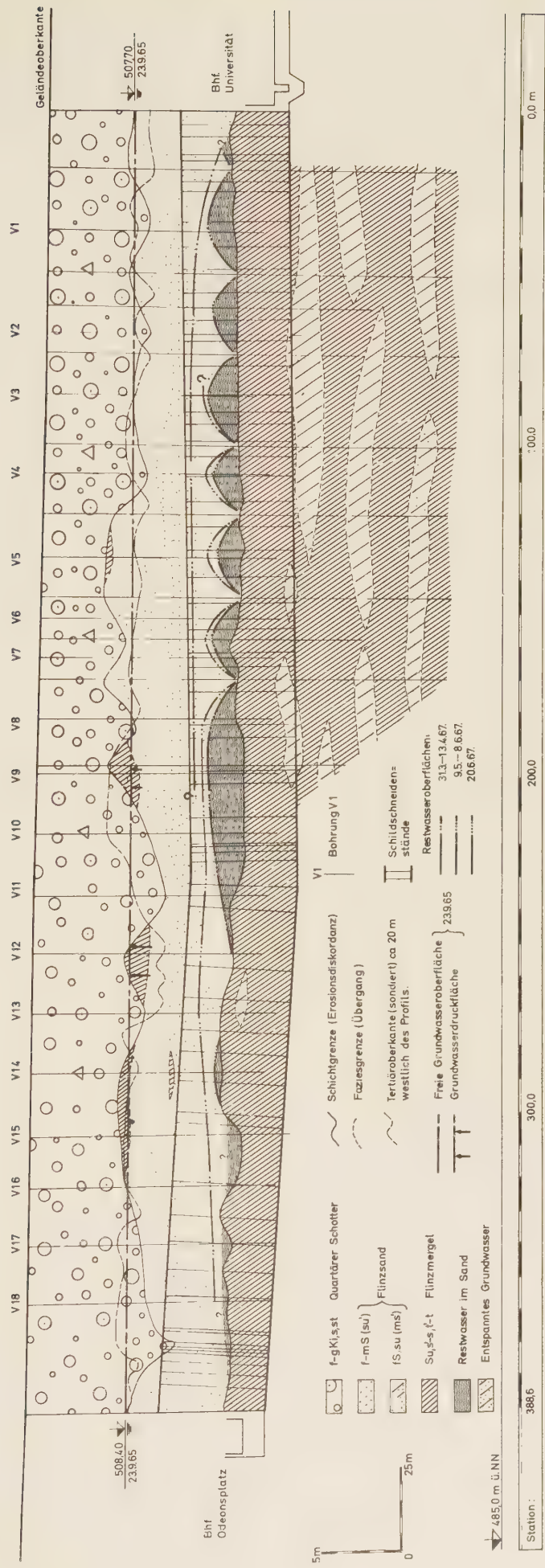
Da die bisherigen Erfahrungen zeigten, daß es in diesem Fall unmöglich ist, in der projektierten Höhenlage des Tunnels das Restwasser im Quartär mit dem Schild zu unterfahren (keine undurchlässige Schicht zwischen Kies und Sand, also ein Grundwasserstockwerk!), wurde auf die übliche Weise die Tertiäroberkante sondiert und das Quartär mit Hilfe von entsprechend angeordneten Gravitationsbrunnen nachweislich völlig entwässert. Ebenso wurden durch diese Brunnen die im Mergel liegenden Feinsandlinsen entspannt (Tafel 31; Ganglinie P 43 (T)).

Die Grundwasseroberfläche ist für einen Zustand vor Beginn der Grundwasserabsenkung (16.11.1966) für den 23.9.1965 in der Tafel 29 eingezeichnet. Der Grundwasserspiegel wurde im Tunnelbereich um etwa 3.5 - 5 m abgesenkt. Die Grundwasseroberfläche vom 31.3.1967 bis 13.4.1967 entspricht einem, durch die beidseitig der Trasse angeordneten Gravitationsbrunnen erreichten Beharrungszustand (Tafel 29). Über dem Stauer verblieb nach den Beobachtungsergebnissen aus Bohrungen zwischen den Röhren ein 1.5 bis 2.10 m mächtiges Restwasser. Auf dieses Restwasser wirkte der sich vom Bahnhof Universität nach Süden bewegend Schild und der ungedichtete Tunnel wie ein Horizontalbrunnen (Tafel 30: Fig. 12). Hierbei stand dem eindringenden Restwasser nur eine relativ geringe Eintrittsfläche (6.70 m Schilddurchmesser) zur Verfügung. Die Strömungsgeschwindigkeit ($v_{\max}$) der eindringenden Wassermengen überschritt in Abhängigkeit vom Grundwasserstand über dem Stauer dann sehr bald die Filtergeschwindigkeit, d.h. es wurde Flinzsand transportiert (Erosion).

In Tafel 30 wurden nach den Aufmaßen der örtlichen Bauleitung typische Stadien der Erosion beim Schildvortrieb dargestellt:

An der Ortsbrust zeigten sich je nach Grundwasserstand über dem Stauer 0.10 - 0.60 m mächtige "Vernässungszonen" über der Flinzmergeloberkante (Tafel 30: Fig. 1, 2, 4, 5, 6, 8), wobei meist schon eine geringmächtige (0.005 bis 0.010 m) "Ausspülzone" unmittelbar über dem Stauer entstand (Tafel 30: Fig. 12). In Abhängigkeit von der Wassermenge und von der Vortriebsgeschwindigkeit setzten nun zum überwiegenden Teil durch Nachbrechen und durch Wegspülen des nachgebrochenen Materials die bekannten Erosionserscheinungen ein, wobei der sich bildende Erosionsschlauch wiederum gleichsam als "Horizontalbrunnen" wirkte und somit sein Einzugsgebiet ständig vergrößerte (Ansteigen der Wassermenge).

Die Entstehung größerer, den Vortrieb hindernder Kavernen begann dort, wo die Schildschneide die Vernässungszone durchbrach (mechanische Störung des Bodengefüges), oder wo durch ein Relief des Stauers praktisch die Entstehung eines Quellschlundes vorgezeichnet wurde (Tafel 30: Fig. 4 - 10). Primäre Unterschiede in der Durchlässigkeit der Sande wirkten sich nach den bisherigen Beobachtungen nicht in diesem Sinne aus.



Tafel 29 Hydrogeologisches Profil im Bereich des Tunnel 3 im Baulos 6

Im Tunnel 3 (und 4) setzte meist dann die Bildung größerer Erosionskavernen ein, wenn der Wasserandrang an der Brust über 0.35 l/s betrug; dies entsprach etwa einer Restwassermächtigkeit von ca. 0.70 bis 0.80 m. Die entstehenden Kavernen mußten verschalt und mit abbaubarem Verpreßmörtel verfüllt werden. Lag der Wasserandrang unter 0.25 l/s, so waren die Verhältnisse im Baubetrieb ohne besondere Maßnahmen beherrschbar. Bei technisch bedingten Stillständen führte jedoch auch schon ein geringer Wasserandrang zur Kavernenbildung (vgl. Tab. 25: Station 126.0 und 161.3).

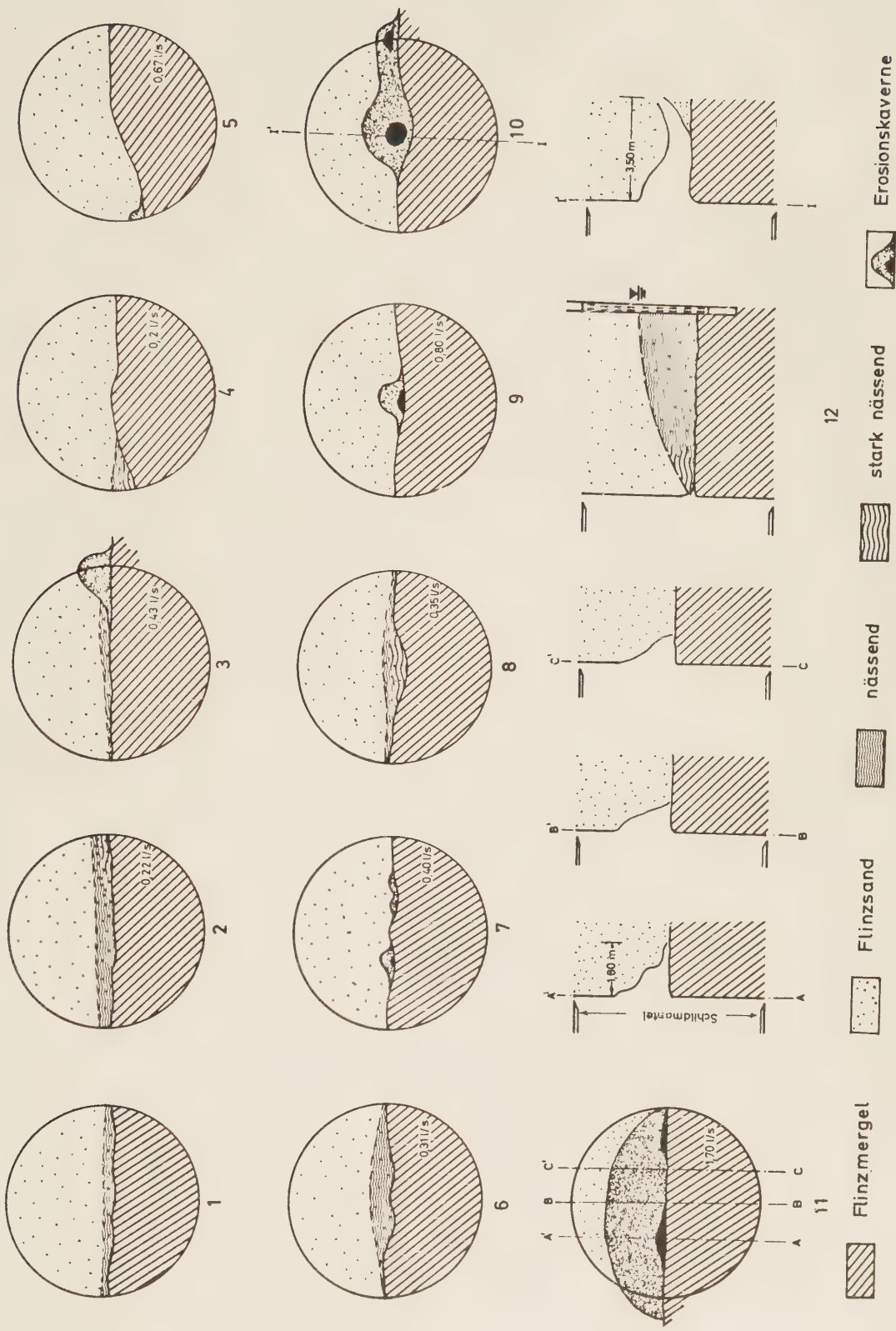
Die Stationen mit einem wesentlichen Wasserandrang beim Vortrieb des Tunnel 3 sind in Tabelle 26 verzeichnet.

Tabelle 26 Restwasserandrang und seine Auswirkung beim Schildvortrieb des Tunnel 3 im Baulos 6

Station (m)	Datum	Wasserandrang an der Ortsbrust l/s	Auswirkung
89.0	19.5.1967	0.43 - 0.56	Erosionskavernen bis 1 m Ø
	23.5.1967	0.20 - 0.37	Zeitweilige Einstellung des Schildvortriebs
100.8	23.5.1967	0.67 - 0.83	Erosionskavernen
103.3	24.5.1967	0.40 - 0.80	Erosionskavernen, Verschlammung des Materials zeitweilige Einstellung des Schildvortriebs
126.0	29.5.1967	0.35 - 0.60	Keine Erosionserscheinung (erhöhte Vortriebsgeschwindigkeit!)
161.3	1.6.1967	0.35	Techn. Stillstand führt zur Bildung von Erosionskavernen Zeitweilige Einstellung des Schildvortriebs
162.0	1.6.1967	keine Messung	Erosionskavernen (3.5 x 1.2 x 1.2 m) Zeitweilige Einstellung des Schildvortriebs
165.2	2.6.1967	0.22	Praktisch keine wesentliche Behinderung mehr
bis 388.6	24.6.1967	0.18 - 0.20	Andauernder Schildvortrieb (Vakuumwasserhaltung)

Tabelle 27 Erosionserscheinungen durch Restwasserbewegung und ihre Vermeidung im Trassenbereich in offener Baugrube und im Schildvortrieb

Restwasser aus:	Vorfluter:	Wirkung:	Abhilfe:	Vertretbare Verhinderung:
<u>quartären</u> <u>Kiesen</u> (+jungtertiären Sanden)	Offene Baugrube	<u>gefährlich:</u> Liegt Kies über Sand, dann: → Erosionskavernen → Setzungen	Fassen des Wassers an der Stauoberkante, Verpressen der Kavernen, dichter Verbau (mit evtl. Zusatzbrunnen)	Nach Freilegung der Tertiäroberkante können die Ansatzpunkte von Zusatzbrunnen so gesetzt werden, daß sie das noch im Quartärkies fließende Wasser fördern und so Erosionskavernen verhindern
	Schildvortrieb	<u>gefährlich:</u> Bei fehlender oder nur geringer Flinzmergelüberdeckung → Einbrüche in der Firste → Erosionskavernen → Setzungen, außerdem Verschlammungen des Abbaumaterials	Zusatzbrunnen bei der Abfolge Kies - Flinzmergel; Verpressen von über Tage und vom Schild aus	Anordnung der Absenkbrunnen nach vorausgegangener Sondierung der Tertiäroberkante. Tieferlegen der Tunnelstrecke, so daß eine möglichst mächtige Flinzmergeldecke über der Firste erhalten bleibt. (Druckluft)
<u>jungtertiären Sanden</u>	Offene Baugrube	Meist harmlos bei großen Baugruben	Offene Wasserhaltung (evtl. Verpressen oder Kiesfilter)	Nicht nötig
	Schildvortrieb	<u>gefährlich:</u> Bei Wasserandrang über ca. 0.35 l/s → Kavernen → ungleichmäßige Brust → Setzungen. Verschlammung des Abbaumaterials	Erhöhte Vortriebsgeschwindigkeit, Verbauen der Brust, Verpressen der Kavernen, Entwässerung vom Schild aus (Lanzen), Vakuum(groß)brunnen	Vertikale Vakuum(groß)brunnen, unter Umständen je nach Gegebenheiten auch Vakuumhorizontalbrunnen(dicht über dem Stauer) (Druckluft)



Tafel 30 Erosionskavernen beim Schildvortrieb (Tunnel 3 und 4 im Baulos 6)

5.53 Beurteilung und Zusammenfassung

Abschließend läßt sich sagen, daß die Wirkungen der Restwässer aus Quartärkiesen oder Tertiärsanden bei offenen Baugruben mit relativ einfachen Mitteln beherrscht werden können. Die im Zusammenhang mit der inneren Erosion bisher nachweisbaren Setzungen (< 10 mm) sind im bautechnischen Sinn als unbedeutend anzusehen.

Beim Schildvortrieb dagegen führt das austretende Restwasser eine wesentlich unangenehmere Rolle und es sind fast immer Sondermaßnahmen erforderlich. Bei Einbrüchen des Restwassers aus dem Quartärkies ist ein weiterer Vortrieb ohne Hilfsmaßnahmen nicht mehr möglich; eine Unterfahrung von Restwasser ist nur möglich bei einer mehrere Meter mächtigen Flinzmergelüberdeckung über der Firste. In solchen Fällen ist auch auf ältere Bohrungen im Tunnelbereich zu achten, da sie leicht die Wege für Wassereinbrüche bilden können. Nachdem bei den Schildröhren zwischen Odeonsplatz und Sendlinger-Tor-Platz dasselbe Restwasserproblem, bedingt durch die ähnlichen hydrogeologischen Gegebenheiten auftritt, gibt die Tabelle 27 noch einmal einen Überblick über die Wirkung des Restwassers und über Hilfsmaßnahmen zur Verhinderung oder zur Verminderung der inneren Erosion.

Der vollmechanische Schildvortrieb hatte trotz der beschriebenen, zum Teil erheblichen Schwierigkeiten ganz wesentliche Vorteile, die in Tabelle 28 zusammengefaßt sind. Es zeigt sich, welche große Vortriebsleistungen und welche geringe Setzungen längs der Trasse möglich waren.

Beim Schildvortrieb im Baulos 9 wurde in der nördlichen Tunnelstrecke inzwischen eine mittlere Vortriebsleistung von 20 m/Tag und eine maximale Vortriebsleistung von 28 m/Tag erreicht. Eine neue Höchstleistung von 30.4 m/Tag wurde im August 1968 in der südlichen Tunnelstrecke des Bauloses 9 erreicht.

Tabelle 28 Vortriebsleistungen und Setzungen beim Schildvortrieb im Baulos 6

Tunnel	maximale Setzungen			Durchschnittsleistung m/Tag ⁺)	max. Leistung m/Tag ⁺)	Behinderung durch
	Schild-achse mm	seitl. Gebäude mm	Siegestor mm			
1	22 } zus. 24 23	3	6-11	5.39	16.20	Wassereinbruch aus Quartärrinnen Diagenetische Verfestigungen (Mergelstein = Fels)
2		zus. 20 0	5-11	10.37	17.03	
3	12 } zus. 18 14	3	-	11.42	20.03	Restwasser im Tertiärsand über einem im Schildbereich liegenden Stauer +trockene Quar-tärrinne (Kies)
4		10	-	11.10	19.12	Restwasser im Tertiärsand über einem im Schildbereich liegenden Stauer

⁺) 1 Tag = 20 Arbeitsstunden

4.6 Vakuumwasserhaltung

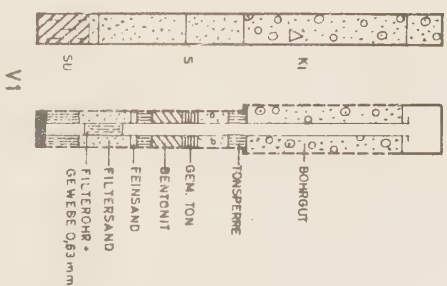
4.61 Vakuumgroßbrunnen

Um das Restwasser so zu beseitigen, daß keine Kavernenbildungen mehr auftreten, wurden bei Schildstrecken zusätzlich zu den Gravitationsbrunnen noch "Vakuumgroßbrunnen" abgeteuft. Bei Vakuumgroßbrunnen sind im Gegensatz zu den üblichen Vakuumlanzen die Fördereinrichtungen (Tiefpumpe, Steigleitung) völlig von der Vakuumeinrichtung getrennt. Dies ist notwendig, da das Wasser aus größeren Tiefen als 8 m gefördert wird.

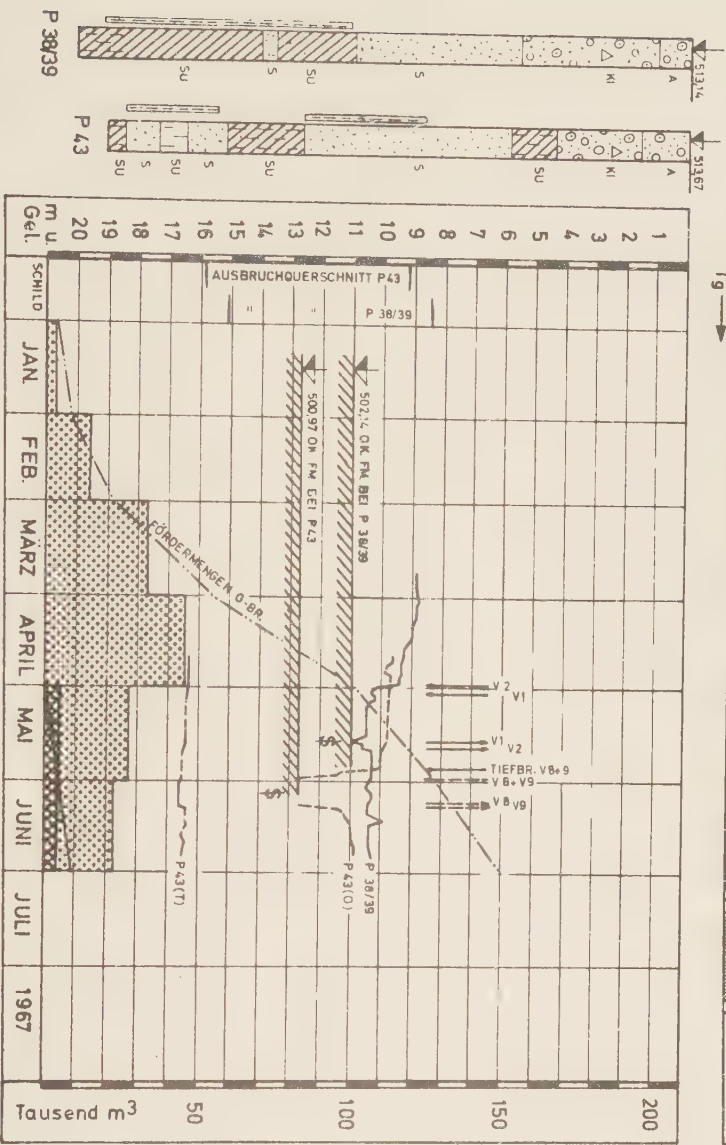
Bei diesen Brunnen (Tafel 31) wird durch ein Vakuumaggregat, das an der Geländeoberfläche steht, ein Unterdruck im Filter erzeugt. Nach Herstellung des Vakuums ist der Druck auf dem den Filter umgebenden Boden im Idealfall fast



VAKUUMBRUNNEN



DIE FILTERSTRECKE DER V.-BRUNNEN WURDE AB V2 TIEFER GEGESST, SO DASS DAS FILTERROHR DEN STÄUER NUR UM ETWA 0,20-0,30m ÜBERRAGT.



Ein- und Abschalten des Vakuumbrunnens
 OK FM Oberkante Flinzhmer
 Filter = Filterstrecke
 Mon. Fördermenge d-G-Br. Mon. Fördermenge d-V-Br. Mon. Fördermenge d-G-Br. Mon. Fördermenge d-V-Br.

Tafel 31 Vakuumwasserhaltung im Baulos 6, südliche Tunnelstrecke, Tunnel 3

gleich Null, während in der Grundluftzone (im Porenraum über der Grundwasseroberfläche) der atmosphärische Luftdruck herrscht. Infolgedessen wird das Restwasser in den unter Unterdruck stehenden Filter gesaugt (bzw. durch den auflastenden atmosphärischen Luftdruck in den Filter gedrückt), bis der Restwasserspiegel soweit abgesenkt ist, daß der Brunnenfilter über die Wasseroberfläche herausragt und sich ein radial nach außen schwächer werdender Unterdruckraum auch in der Grundluftzone um den Brunnen ausbilden kann. Durch diese Verhältnisse wird der Beharrungszustand gekennzeichnet.

Der optimale Brunnenausbau und Brunnenabstand wird empirisch ermittelt; er ist je nach den örtlichen Verhältnissen verschieden. Beim Tunnel 3 im Baulos 6 wurden die Vakuumbrunnen im Abstand von ca. 18 m zwischen den projektierten Röhren abgeteuft; bei Tunnel 4 waren weitere Vakuumbrunnen im Abstand von ca. 10 m westlich der Röhre 4 notwendig. Die Bauart ist in Tafel 31 aufgezeigt.

Die Wirkung der Vakuumbrunnen läßt sich anhand der in Tafel 31 dargestellten Ganglinien der Pegel 38/39 zeigen beim Einschalten der nahegelegenen Vakuumbrunnen eine rasche Absenkung bis auf etwa 0.50 m über den Grundwasserstauer. Solche Restmächtigkeiten (0.50 m) des Grundwassers dürften durch Reliefunterschiede des Stauers oder durch etwas zu hoch sitzende Filterstrecken der Vakuumbrunnen bedingt sein.

Im Schildbereich wirkt zunächst der Stollen als Vorfluter (Restmächtigkeit des Grundwasser = Null). Durch die Verpressung verliert jedoch der Tunnel schon bald seine Vorflutwirkung. Der Grundwasserspiegel steigt nach dem Abschalten der Vakuumbrunnen rasch wieder bis zu einer Höhe an, die durch andere, inzwischen eingeschaltete Vakuumbrunnen bedingt ist.

Die Ganglinie P 43 (0) (Tafel 31) zeigt nach dem Einschalten der Vakuumbrunnen einen 100proz. Absenkerfolg. Der Druckspiegel eines tieferen Grundwasserstockwerks (P 43 T in Tafel 31) wurde, wie schon erwähnt, durch die Gravitationsbrunnen entspannt und unter die Tunnelsohle abgesenkt. Dieses Grundwasserstockwerk blieb durch die Vakuumbrunnen unbeeinflußt, da diese die Grundwasserdeckfläche dieses Grundwasserstockwerks nicht durchteufen.

Meßbare Wassereintritte im Tunnel 3 waren nach Abschalten der Vakuumbrunnen V 1 - V 16 an etwa 30 - 35 Stellen bei einer Tunnellänge von 388.60 m

meist im Bereich der Primärverpressung feststellbar. Die eindringenden Wassermengen lagen nach einer Messung vom 23.6.1967 zwischen 0.005 und 0.20 l/s. An einer Stelle, die absichtlich offengehalten wurde, traten etwa 0.5 l/s ein. Insgesamt ergab die Summe der meßbaren Wassereintritte 2.13 l/s.

Am Ende des Tunnels förderte die offene Wasserhaltung laut einer Messung vom 24.7.1967 etwa 3.3 l/s (nach Abschalten der Vakuumbrunnen-Wasserhaltung). Das erwähnte Restwasser aus den tertiären Sanden trat aus Tübbingfugen und Verpreßlöchern in den Tunnel ein.

Die Laufzeiten der Vakuumgroßbrunnen sind im Vergleich zu denen der Gravitationsbrunnen relativ kurz. Die Vakuumgroßbrunnen werden in der Regel ca. drei Tage vor Schilddurchgang an der betreffenden Stelle eingeschaltet und ca. drei Tage nach Schilddurchgang abgeschaltet. Je nach den örtlichen Gegebenheiten und den technischen Erfordernissen ergaben sich im Baulos 6 in der südlichen Tunnelstrecke Laufzeiten der Vakuumbrunnen zwischen 3 und 21 Tagen; die durchschnittliche Betriebsdauer lag bei 7 Tagen.

4.62 Vakuumhorizontalbrunnen

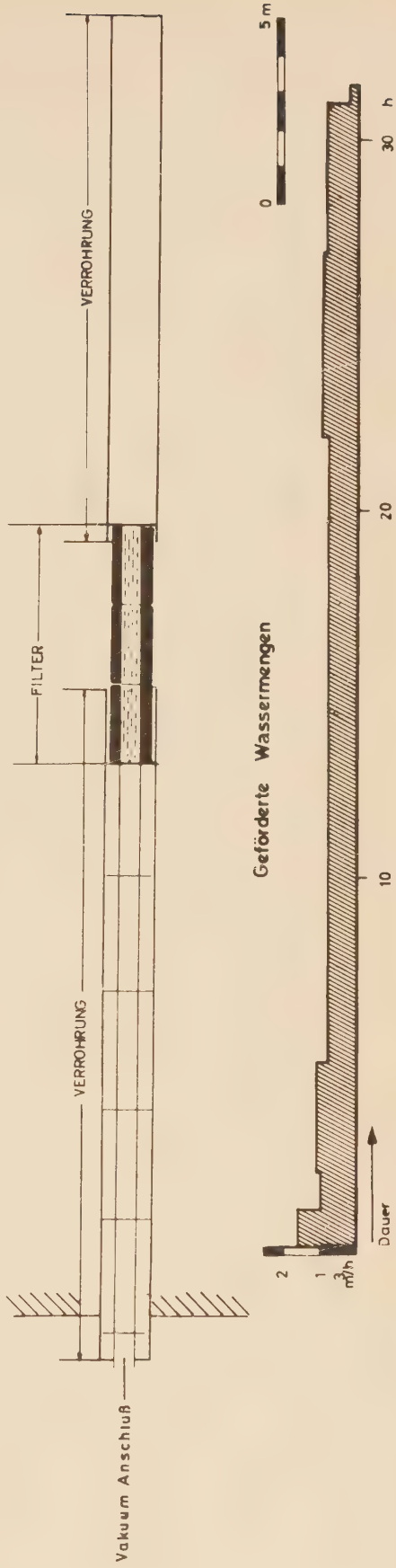
Zur Beseitigung des Restwassers in den Tertiärsanden wurde im Baulos 6 vom Zielschacht (Bhf. Odeonsplatz) aus eine Horizontalbohrung dicht über der Schichtgrenze Flinzsand/Flinzmergel vorgetrieben und zum Vakuumhorizontalbrunnen ausgebaut (Tafel 32). Die ca. 35 m "tiefe" Bohrung wich allmählich gegen das Liegende hin ab und tiefte sich ab ca. 23 m in den liegenden Flinzmergel ein. Da die Verrohrung beim Ziehen bei 21 m abriß, konnte der geplante Ausbau nicht verwirklicht werden. Der in der Tafel 32 eingezeichnete Ausbau stellt eine Notlösung dar. Trotzdem zeigen die Ergebnisse des Pumpversuchs die grundsätzliche Wirksamkeit auch solcher Anlagen. Aus bohrtechnischen und wirtschaftlichen Gründen dürfte jedoch ihre Anwendung zumindest bei "Tiefen" über 20 m problematisch sein.

Der Pumpversuch (Tafel 32) wurde nach 31.5 Stunden eingestellt, da die Filterstrecken zu diesem Zeitpunkt aus dem Restwasser ragten und somit keine weitere Absenkung mehr erzielt werden konnte. Die geförderten Wassermengen nahmen rapide ab. In einem Pegel in ca. 20 m Entfernung wurde während des Pumpversuches eine Absenkung von 0.20 m beobachtet.

Bohrprofil



Ausbau des Bohrloches zur Durchführung von Pumpversuchen



Tafel 32 Horizontalbohrung im Baufeld 6, südliche Tunnelstrecke

4.7 Geförderte Wassermengen

Die Messung der geförderten Wassermengen erfolgt durch Flügelradmesser (Voltmannzähler) oder Venturimeßanlagen. Im allgemeinen sitzen die Zähler nur in den Hauptableitungsrohren. Einzelleistungen von Brunnen werden aus wirtschaftlichen Gründen nur in Ausnahmefällen registriert. Die geförderten Wassermengen wurden in den Nymphenburger Kanal, in das Städtische Kanalnetz oder in private Brauchwasserversorgungen eingeleitet.

4.71 Gravitationsbrunnen

Die Ergiebigkeit einzelner Gravitationsbrunnen wurde im Baulos 6, im Zusammenhang mit den schon erwähnten Wassereinbrüchen am Schild, gemessen. Es handelte sich hierbei nicht um Dauerregistrierungen, sondern nur um Einzelmessungen. Die Ergebnisse lagen für die ca. 25 m tiefen Brunnen zwischen 0.075 und 3.90 l/s. In den Baulosen 9 und 10 wurden die Gravitationsbrunnen aus technischen Gründen zum Teil mit Einzelzählern ausgerüstet und auch im Baulos 4 und 01 wurden Einzelzähler in manchen Fällen täglich abgelesen. Nach den bisherigen Feststellungen fördern die Gravitationsbrunnen zwischen 0.002 und 15 l/s.

Der Grund für diese sehr unterschiedlichen Leistungen liegt in der Verschiedenheit der hydrogeologischen Gegebenheiten in den einzelnen Baulosen bzw. in den verschiedenen Brunnenorten. Bestimmend für eine hohe Wasserförderung ist die von dem Brunnen durchhörte und verfilterte Grundwassermächtigkeit in den gut durchlässigen, quartären Schottern. So wurden relativ hohe Einzelleistungen zwischen 2 und 15 l/s in Brunnen gemessen, die bis zu 7 m mächtige, grundwasserführende Quartärkiese durchteuften. Brunnen, bei denen die Quartärkiese grundwasserfrei waren, förderten bei ungespanntem Grundwasser je nach Mächtigkeit der erfaßten Tertiärsande bis zu 0.7 l/s; die Mittelwerte lagen zwischen 0.1 und 0.3 l/s. Wurden jedoch Grundwasserstockwerke mit gespanntem Grundwasser durch die Brunnen erfaßt (Baulos 9 und 10), so wurden Fördermengen zwischen 0.2 und 5.5 l/s erreicht, je nach Zahl der erfaßten Grundwasserstockwerke (2), nach Mächtigkeiten der Grundwasserleiter (bis zu 15 m) und nach den Höhen der Druckspiegel (bis zu 10 m). Von Privatbrunnen ist bekannt, daß z.B. bei ungestörten Verhältnissen ein Brunnen aus einer nur 3 m

mächtigen Flinzsandschicht, die gespanntes Grundwasser führt, bis zu 4 l/s entnimmt. Ein anderer, 60 m tiefer Brunnen fördert aus zwei gespannten Grundwasserstockwerken bis zu 10 l/s.

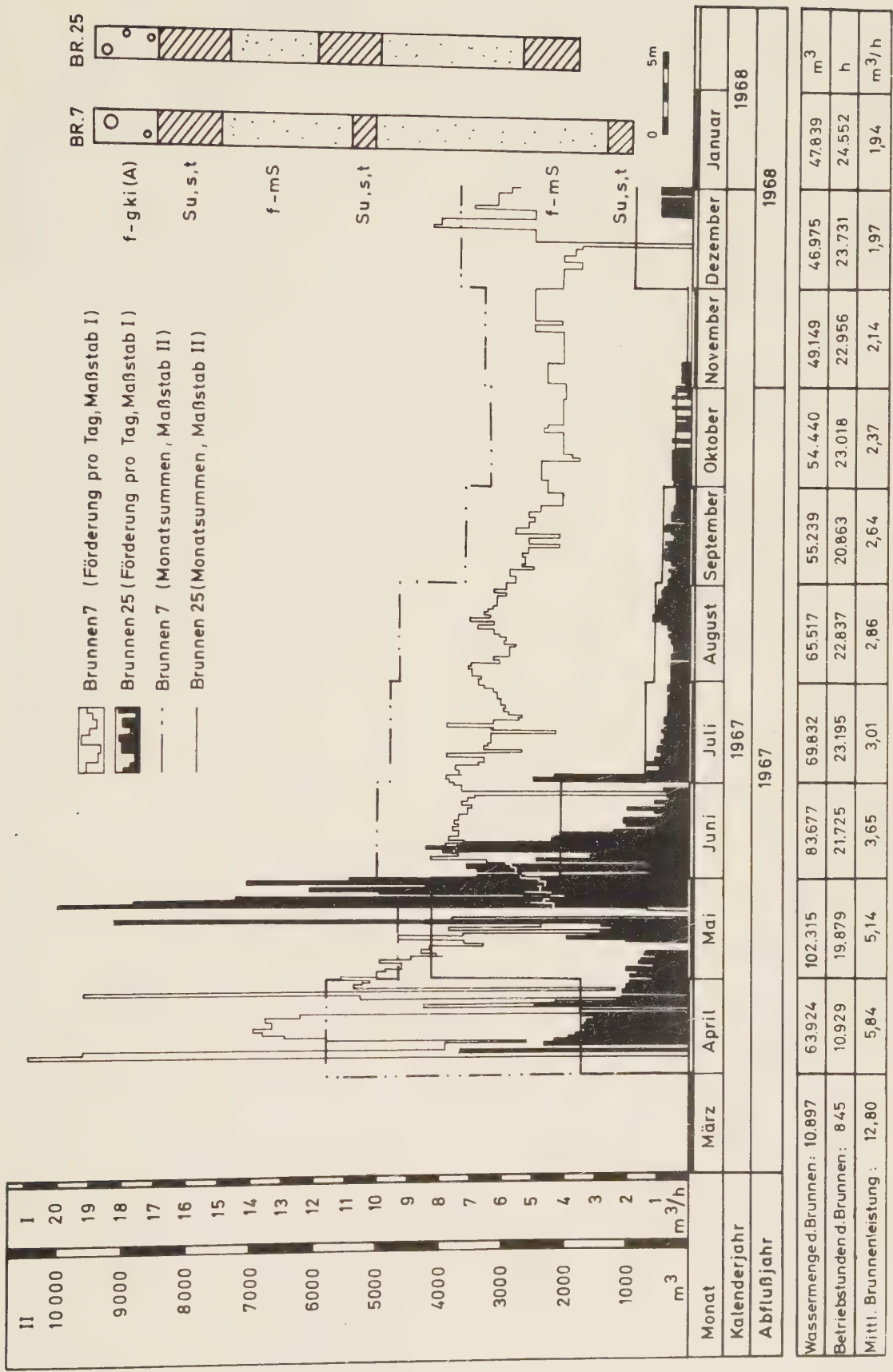
Bei der Diskussion der Ergiebigkeit des Gravitationsbrunnens ist jedoch zu beachten, daß die einzelnen Absenkbrunnen in Galerien angeordnet sind, so daß sich die einzelnen Brunnen gegenseitig beeinflussen. Außerdem ist selbstverständlich auch die Fördermenge zeitlich verschieden: nach Erreichen des Beharrungszustandes nimmt die geförderte Wassermenge erheblich ab (Tafel 33), da nun der Boden im Bereich des Entnahmetrichters entwässert ist und nur noch die zuströmenden Wassermengen gefördert werden können.

Zwei 25 m tiefe Gravitationsbrunnen des Bauloses 01 förderten zu Beginn der Grundwasserabsenkung 11.6 und 10.7 l/s. Die Grundwassermächtigkeit in den quartären Schottern betrug hier ca. 5 m, außerdem wurde eine ca. 1.4 m mächtige, sehr gut durchlässige Riesellage durch die Brunnen erschlossen. Nach 48 Tagen (Beharrung erreicht) förderte der erste Brunnen nur noch 4.6 l/s und der zweite nach 42 Tagen 6 l/s. Insgesamt schwankten die Einzelleistungen der zu diesem Zeitpunkt laufenden 18 Brunnen zwischen 0.5 und 10.5 l/s. Die geförderte Gesamtmenge der 18 Brunnen ergab 80.8 l/s, d.h. die mittlere Brunnenleistung lag zum Zeitpunkt der Messung bei ca. 4.5 l/s pro Brunnen.

Der relativ rasche Rückgang der Fördermengen in Abhängigkeit von der Zeit ist für drei Brunnen in der Tabelle 29 dargestellt.

In der Tafel 33 sind die aus Tageswerten errechneten Stundenmittel zweier Gravitationsbrunnen (7 und 25) des Bauloses 10 in Abhängigkeit von der Zeit als Kurven dargestellt. Zum Vergleich sind auch die Monatssummen ihrer Fördermengen als Kurven eingezeichnet. Die Brunnen fördern beide nur aus dem Tertiär. Die starken Schwankungen sind wohl durch das Ein- und Ausschalten benachbarter Brunnen bedingt. Trotzdem ist das Absinken der Fördermenge nach dem Erreichen des Beharrungszustandes deutlich zu erkennen. Dies zeigen auch die in der Schriftleiste der Tafel 33 angegebenen mittleren Gesamtleistungen der maximal 30 Brunnen des Bauloses.

In der Tafel 34 sind die Mittelwerte (14. 3. 1967-31. 12. 1967) der Leistungen für die Gravitationsbrunnen des Bauloses 10 angegeben. Auch hier zeigen sich die örtlichen großen Unterschiede in der Fördermenge der Einzelbrunnen.



Tafel 33 Tagesmittel und Monatssummen der Leistung der Brunnen 7 und 25 im Baules 10

Tabelle 29 Fördermengen der Gravitationsbrunnen 3, 3a, 3b (Baulos 01) und 5 (Baulos 1)

Datum	Brunnen	Förderungen l/s
1.8.1967	3	3.2
4.8.1967		2.8
21.8.1967		2.0
12.7.1967	3 a	9.5
18.7.1967		12.5
25.7.1967		10.0
31.7.1967		10.0
7.8.1967		8.8
21.8.1967		6.0
12.8.1967	3 b	11.4
13.8.1967		9.5
15.8.1967		8.8
21.8.1967		6.0
1.7.1965	5	5.2
30.7.1965		4.6
31.8.1965		3.3
30.9.1965		2.9
29.10.1965		2.5
30.12.1965		2.6
30. 1.1966		2.5
26. 2.1966		2.3

Auch in recht einfachen Fällen, wie sie in Baulos 4 gegeben sind (Beilage 1, I), sind die Fördermengen der einzelnen Absenkbrunnen zeitlich und örtlich so unterschiedlich (Tabelle 30, Brunnen 8 und 10), daß die Errechnung von Mittelwerten der Leistung für Einzelbrunnen problematisch erscheint.

In der Tabelle 30 sind die Mittelwerte aus der Gesamtförderung und der Betriebsdauer jedes einzelnen Brunnens berechnet, während die Extremwerte aus der täglichen Ablesung der Wassermesser (Voltmannzähler) gewonnen wurden. Die höheren Leistungen der Brunnen liegen zu Beginn der Grundwasserabsenkung. Nach Erreichen des Beharrungszustandes geht die Förderung zurück. Nach der Tabelle 30 liegen im Baulos 4 die Extremwerte für die Brunnenleistungen, je nach Ort und Zeit, zwischen 0.001 und 1.040 l/s, die Mittelwerte für die Einzelbrunnen zwischen 0.006 und 0.200 l/s. Aus der Gesamtförderung des Bauloses 4 und der gesamten Betriebszeit der 18 Gravitationsbrunnen läßt sich eine mittlere Leistung von 0.12 l/s während der Absenkung pro Brunnen errechnen.

Tabelle 30 Geförderte Grundwassermengen und Betriebszeiten
der Absenkbrunnen im Baulos 4

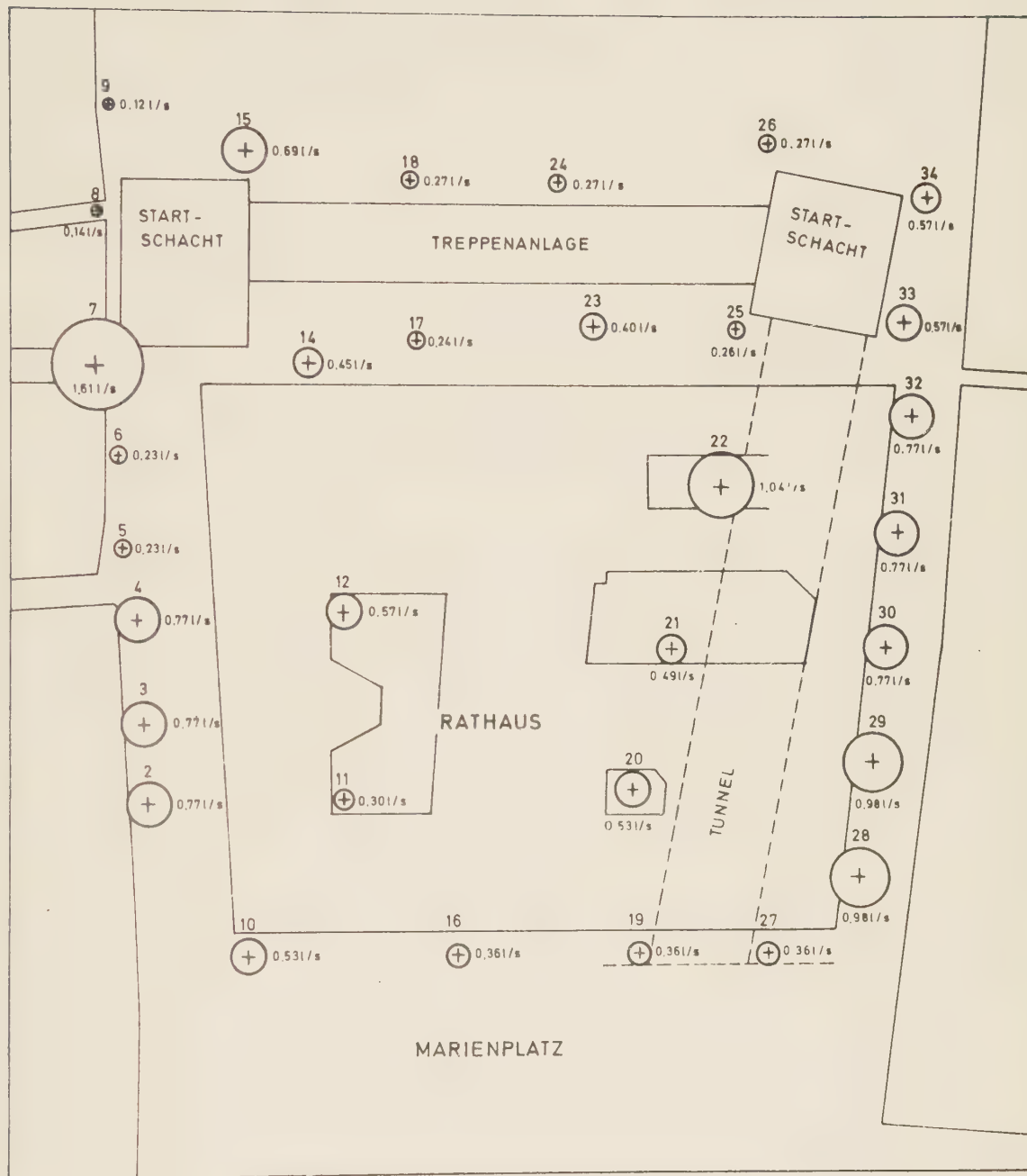
Brun- nen	Tiefe (m)	Gesamt- Fördermenge m	Betriebs- stunden h	Fördermenge	
				Mittel- werte l/s	Extrem- werte l/s
1	17	1 997.5	9 408	0.06	0.016-0.31
2	17	3 155.3	9 720	0.09	0.020-0.62
3	17	3 116.8	9 744	0.09	0.080-0.50
4	17	6 736.6	9 720	0.19	0.063-0.73
5	18	6 970.5	9 720	0.20	0.040-0.83
6	17	6 925.2	9 720	0.20	0.050-0.69
7	17	1 119.1	8 448	0.04	0.070-0.10
8	21.2	153.4	6 264	0.006	0.001-0.03
9	18	4 625.2	6 224	0.20	0.036-0.30
10	17.2	7 137.3	10 176	0.19	0.022-1.04
11	17	5 653.6	9 696	0.15	0.024-0.60
12	22.8	5 240.3	9 744	0.15	0.013-0.88
13	17	2 221.3	9 720	0.06	0.030-0.38
14	23	4 408.8	9 720	0.012	0.050-0.55
15	17	4 615.0	9 768	0.13	0.014-0.43
16	17.3	4 285.7	9 648	0.12	0.016-0.60
17	17.2	2 733.3	8 520	0.09	0.034-0.17
18	20.8	1 266.0	6 264	0.06	0.043-0.71

4.72 Vakuumgroßbrunnen

Die Vakuumgroßbrunnen werden, wie in Abschnitt 4.4 und 4.5 ausgeführt wurde, nur zeitweise zur Beseitigung des Restwassers in den Tertiärsanden verwandt. Im allgemeinen wurden die Wassermengen von je 2 bis 4 Brunnen mit jeweils einem Wasserzähler gemessen.

In der Tafel 31 sind die Tagesmittel der geförderten Wassermengen solcher Vakuumgroßbrunnen in m^3/h als Kurven aufgezeichnet. Die Mengen sind abhängig von der Mächtigkeit des Restgrundwassers. Im Baulos 6 lagen die geförderten Wassermengen bei einer Restwassermächtigkeit von 1.4 bis 2 m zwischen 0.4 und 4.0 m^3/h , im Mittel bei 1.62 m^3/h (= 0.45 l/s).

Die Diagramme in der Tafel 31 zeigen, daß ein solcher Vakuumgroßbrunnen mit Vakuumbeaufschlagung (Kurve schraffiert) das 3- bis 5-fache der Förderung desselben Brunnens ohne Vakuumbeaufschlagung (Kurve nicht schraffiert) leistet.



Tafel 34 Mittlere Leistungen (14.3.-31.11.1967) der Absenkbrunnen im Baulos 10
nach einem Plan der Fa. J. Keller

Die Leistung des Brunnens hängt bis zu einem gewissen Grad von der Höhe des Unterdrucks ab. Auch sinken die Fördermengen im Laufe der Zeit mit zunehmender Entwässerung des Bodens ab.

Auf das Verhältnis der durch die Vakuumwasserhaltung geförderten Grundwassermenge zu den Wassermengen der Gravitationsbrunnen wird in Abschnitt 4.73 gesondert eingegangen.

4.73 Wassermengen der Baulose

Die Tabelle 31 zeigt die Dauer der Grundwasserabsenkung und die bisher geförderten Wassermengen der einzelnen Baulose, d.h. diejenigen Wassermengen, die von den Brunnengalerien pro Baulos gefördert wurden. In den mit * versehenen Baulosen ist die Wasserhaltung noch nicht beendet. Der 31.8.1968 ist ein willkürlich gewählter Stichtag.

Insgesamt wurden also über 22 Mio m³ Wasser vom 25.5.1965 bis zum 31.8.1968 gefördert. Auf die durch Brunnen geförderte Wassermenge (geschlossene Wasserhaltung) entfallen davon 19 729 713 m³, auf die der offenen Wasserhaltung 1 982 698 m³. Hierbei ist die Wassermenge der offenen Wasserhaltung im Baulos 7, z.T. (bis 31.3.68) mit 10 % der Gesamtwassermenge des Bauloses angenommen. Die Wassermenge der offenen Wasserhaltung beträgt im Mittel nur ca. 9.13 % der Gesamtwassermenge.

Die geförderten Wassermengen sind je nach Baulos, nach Brunnenanzahl und nach der Betriebsdauer der Brunnen verschieden: der Grund für diese unterschiedlichen Förderungen liegt in der Verschiedenheit der örtlichen, hydrogeologischen Gegebenheiten. Um den Ablauf der Grundwasserabsenkung in den einzelnen Baulosen zu veranschaulichen, wird für jedes Baulos, in dem die Absenkung beendet oder fast beendet ist, ein "Absenkdiagramm" erstellt (Tafel 35 - 39).

Dargestellt ist in einer Summenkurve die zeitliche Gesamtförderung der Brunnen in m³. Als Treppendiagramm sind die monatlichen Entnahmemengen der Brunnen (schräg schraffiert) und der offenen Wasserhaltung (kreuzweise schraffiert) in m³ und die Betriebszeiten der Brunnen in Stunden für die einzelnen Monate eingezeichnet. Die obere Zahl an der Kurve der Brunnenbetriebszeiten gibt die Anzahl der in dem betreffenden Monat dauernd betriebenen Brunnen an, die

Tabelle 31 Geförderte Wassermengen der Grundwasserabsenkung in den Baulosen der Nord-Süd-Trasse, in den Baulosen der Olympiatrasse und des Stachusprojektes. In den mit einem *) versehenen Abschnitten ist die Wasserhaltung noch nicht beendet

Bau- los	Fördermengen der Brunnen (m ³) (Grundwasser)	Dauer	Fördermenge d. off. Wasserh. (m ³) (Grundwasser u. Oberflächenwasser)	Dauer
1	4 229 138	1.6.65- 31.3.67	ca. 81 705	9.6.65- 31.5.66
2	1 858 815	25.6.65- 30.9.66	22 040	3.1.66- 11.7.66
3	2 500 117	28.4.66- 30.11.67	70 010 (354 973)	12.8.66- 27.10.66 (Kanalbau)
4	71 927	21.9.65- 16.11.66	102 360	1.6.66- 16.11.66
5			332 240	1.8.66- 26.11.67
6	2 985 346	17.12.65- 30.6.68	613 931	1.4.66- 31.8.68) *
7	701 065 (855 497 = Gesamtwassermenge)	28.9.68- 31.8.68) *	154 432	Geschätzt: ≈ 10% bis 31.3.68 31.8.68) *
8			162 480	19.4.67- 2.5.68
9	1 188 427	17.2.67- 31.8.68) *	246 381	30.5.67- 31.8.68) *
10	913 105	16.3.67- 31.8.68) *	18 824	16.10.67- 31.8.68) *
11			37 858	20.7.67- 13.5.68
12	35 889	18.4.66- 7.3.67		
13	1 081 481	24.7.67- 31.8.68) *	9 731	2.9.67-
14	707 946	6.2.68- 31.8.68) *	12 967	1.8.68- 31.8.68) *
15	363 750	16.8.67- 31.8.68) *	18 982	14.8.67- 31.8.68) *
17	254 223	5.4.67 31.8.68) *	94 699	1.3.68- 31.8.68) *
	16 891 229	Gesamtmengen der Nord-Süd-Trasse: 25.5.65- 31.8.68		2 676 834 9.6.65- 31.8.68

Tabelle 31 Fortsetzung

Bau- los	Fördermengen der Brunnen (m ³) (Grundwasser)	Dauer	Fördermenge d. off. Wasserh. (m ³) (Grundwasser u. Oberflächenwasser)	Dauer
01 (+04 V ab Feb. 1968)	1 995 680	21.6.67- 31.7.68	277 400	13.7.67- 30.4.68
02	299 500	1.3.68- 31.8.68)*	14 900	1.7.68- 31.8.68)*
03	16 890	26.7.68- 31.8.68)*		
04	278 364	9.4.68 31.8.68)*		
05	83 400	31.7.68 31.8.68)*		
	Gesamtmen gen der Olympiatrasse			
	2 676 834	21.6.67- 31.8.68	292 300	13.7.67- 31.8.67
Stachus	161 647	27.2.67- 31.8.68)*	6 140	27.2.67-
	19 729 710	Gesamtmen gen:	2 277 080	

untere Zahl bezeichnet die Anzahl der Brunnen, die während des Monats dazugeschaltet (+) oder abgeschaltet (-) wurden. Bei der Kurve der Betriebszeiten ist zu beachten, daß die Brunnenpumpen nicht dauernd förderten, sondern daß sie nur bei bestimmten Wasserständen im Brunnen durch elektrische Pumpenwächter mehr oder weniger lang eingeschaltet wurden. Die effektiven Pumpenstunden sind daher nicht registriert. Soweit eine Pumpendrosselung technisch vertretbar war, wurde der Dauerbetrieb der Unterwasserpumpen angestrebt.

Außerdem sind in den Absenkdiagrammen die Ganglinien verschiedener Pegel eingezeichnet, die einen Schluß auf die Reichweite der Absenkung erlauben. Der Lageplan der Grundwassermeßstellen, das hydrogeologische Profil und die Schichtsäulen der Grundwasserpegel, deren Ganglinien dargestellt sind, ermöglichen einem unbefangenen Betrachter die Interpretation der dargestellten Kurven.

Wie schon in Abschnitt IV, 4. 71 erwähnt, ist in erster Linie bestimmend für eine hohe Wasserförderung die vom Brunnen durchteufte Grundwassermächtigkeit in den durchlässigen Schottern. Gerade diese Grundwassermächtigkeit ist aber von Baulos zu Baulos und von Brunnen zu Brunnen sehr unterschiedlich (vgl. III, 1. 2, Beilage 1, I und 2, I).

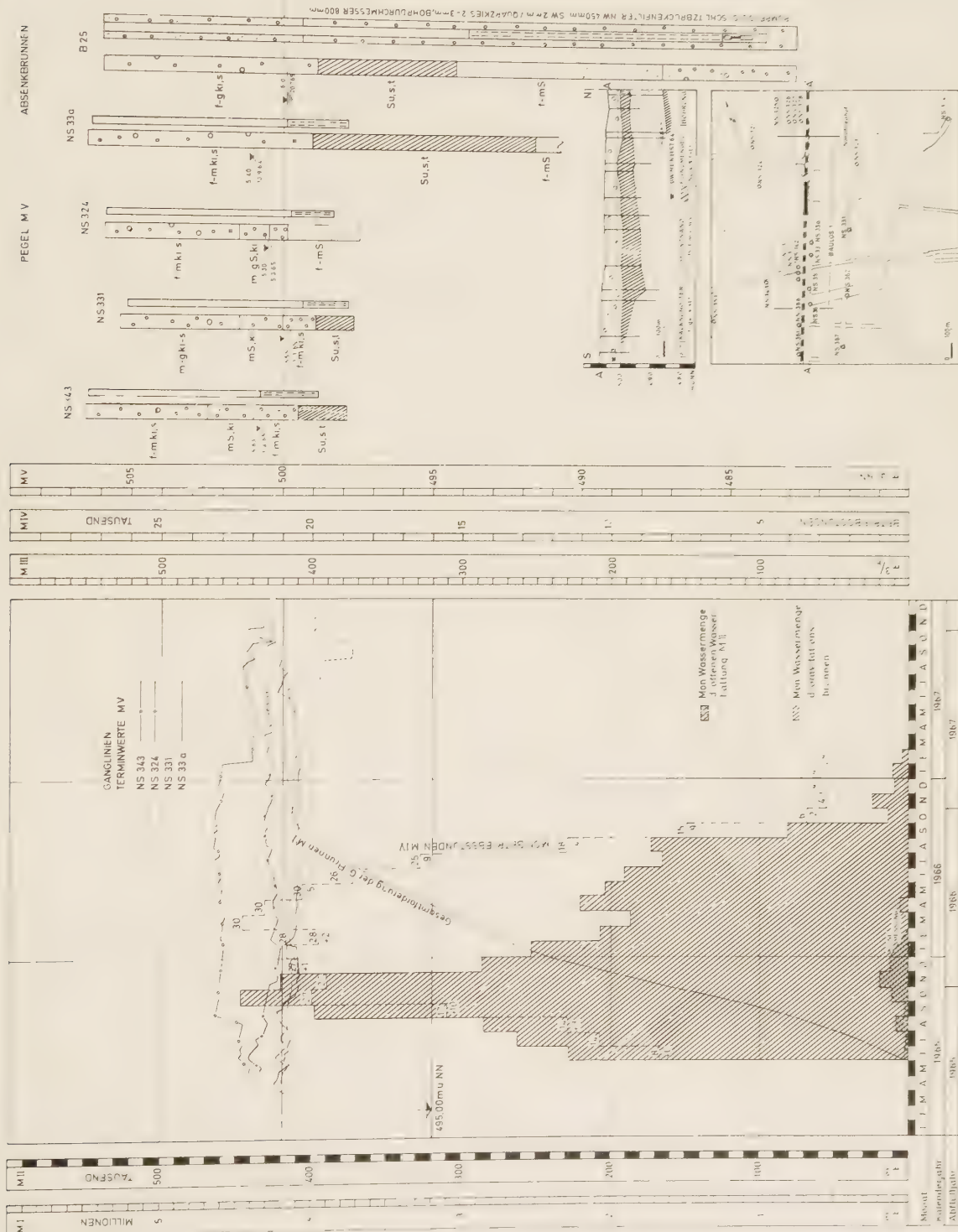
Im Bereich des Bauloses 1 (Tafel 35) wurde ein großer Teil des aus Südwesten anströmenden "Quartärwassers" gefördert (Beilage 1, I). Die nördlicher gelegenen Baulose 2 und 4 wurden daher nur noch von wesentlich geringeren Wassermengen des im Quartärkies nachströmenden Grundwassers erreicht. Außerdem war die mittlere grundwasserführende Quartärmächtigkeit im Baulos 2 und 4 geringer als im Baulos 1. Ein weiterer Grund für die große Wassermenge um Baulos 1 - und wahrscheinlich der Hauptgrund - ist darin zu suchen, daß die Absenkbrunnen im Baulos 1 im Tertiär eine anscheinend bis zu 5 m mächtige Quarzkieslage erfaßten (Tafel 35, Schichtsäule des Absenkbrunnens 25), aus der den Brunnen wesentlich größere Wassermengen zuströmten als aus den Tertiärsanden.

Die Diagramme der Baulose 2 und 3 (Tafeln 36 und 37) können als Normalfälle für Baulose mit geringmächtigem Grundwasser im Quartärkies bezeichnet werden. Einen Sonderfall stellt das Baulos 4 dar: hier steht an der Baugrubensohle undurchlässiger Flinzmergel an, der nach Norden hin ansteigt (Tafel 38), und

GRUNDWASSERABSENKUNG:

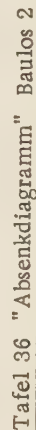
BAULOS 1

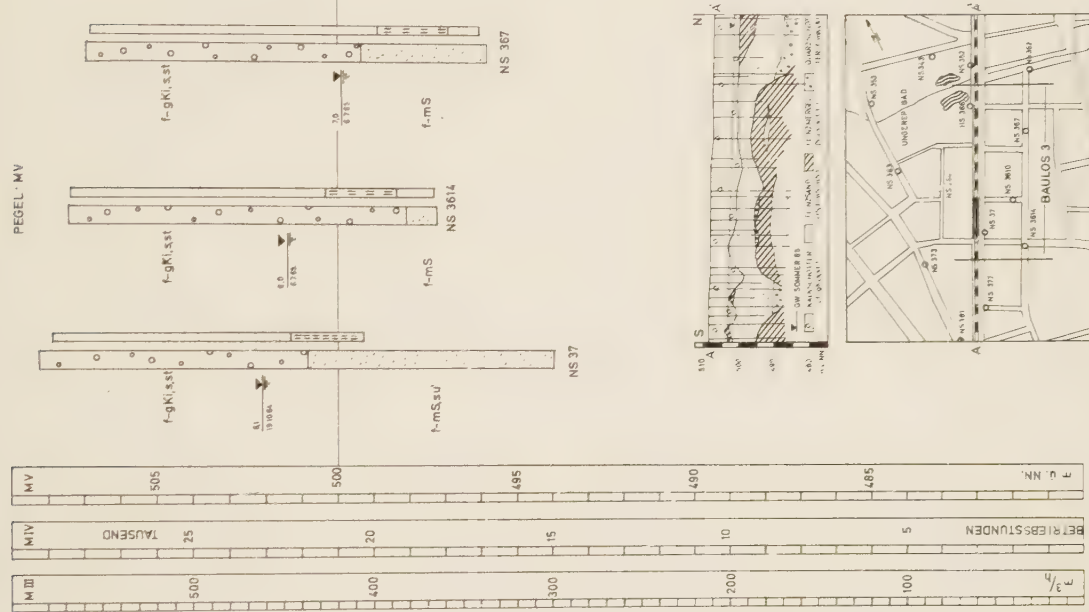
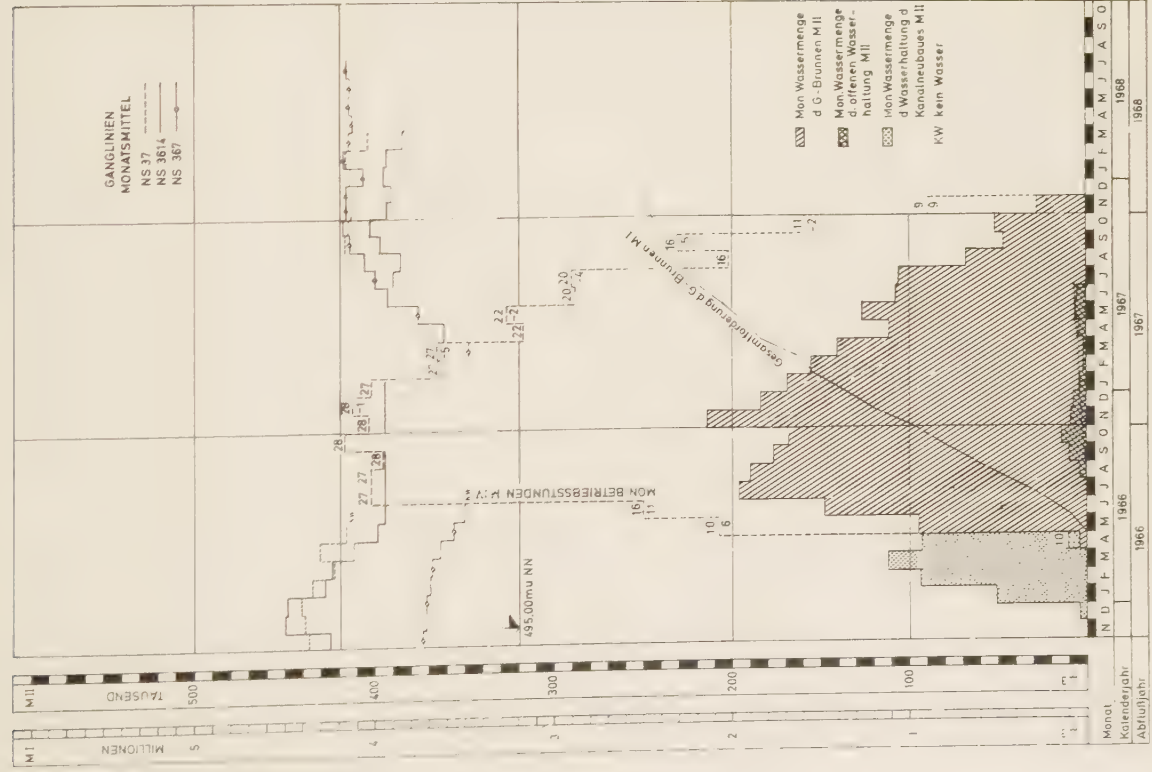
ABSENKDAUER 1,6 65 - 2 3 67
GEF. WASSERMENGE D. MAX. 30 G.-BRUNNEN: 4.180 283 m³
GEF. WASSERMENGE D. OFF. WASSERHALT 65.585 x m³
(MAX 23.100 m³
(X= MIN 200 m³



Tafel 35 "Absenkdigramm" Baulos 1

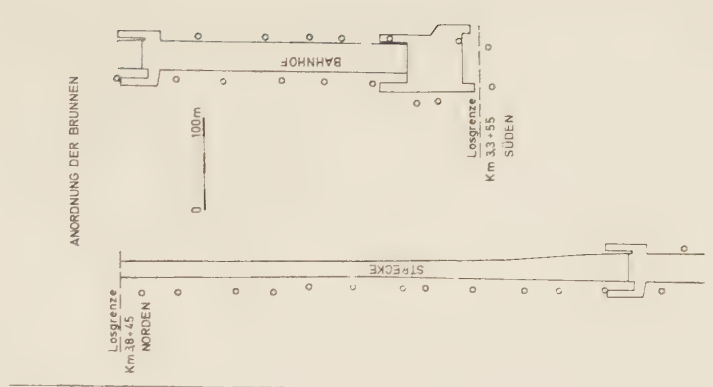
ABSENKDAUER: 25,5-30,968.
GEF. WASSERMENGE D. MAX. 4,0 G. - BRUNNEN: 1958,815 m³
GEF. WASSERMENGE D. OFF. WASSERHALT.: 22,040 m³
LAGESTELLE UND WASSERHAUPTNACHT: 100. 4056



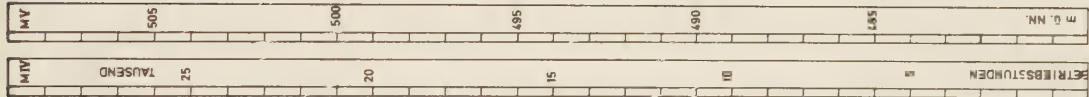
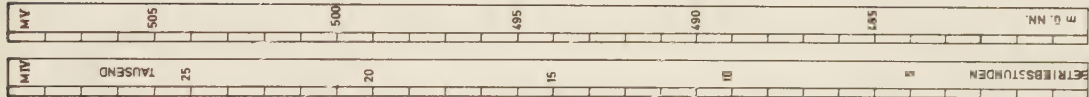
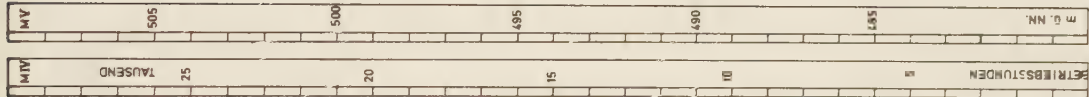
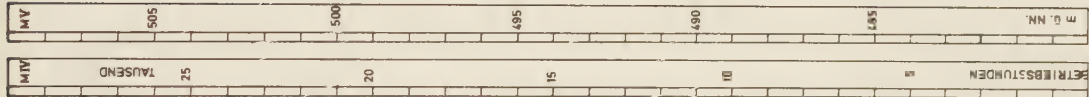
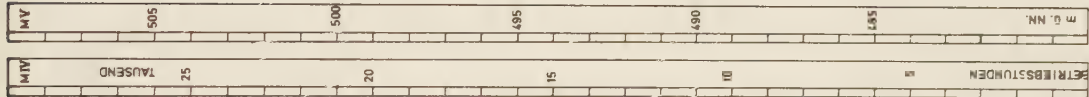
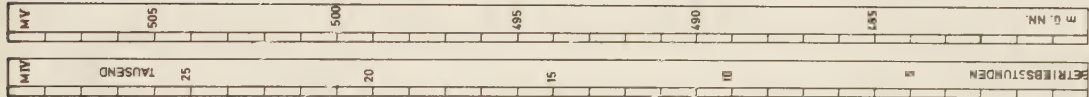
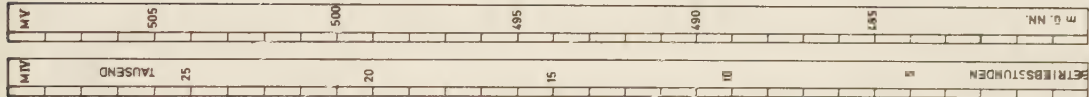
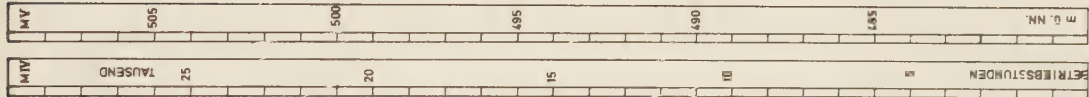
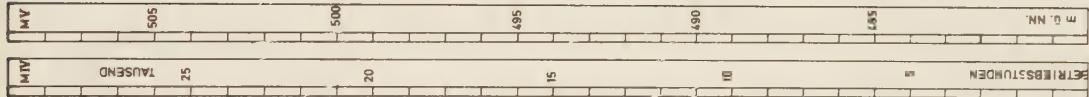
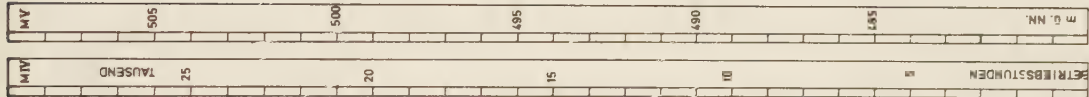
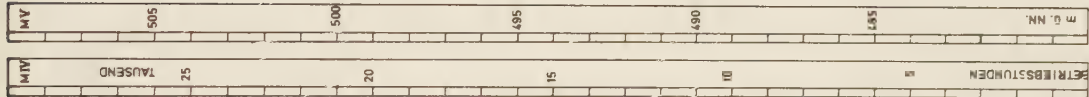
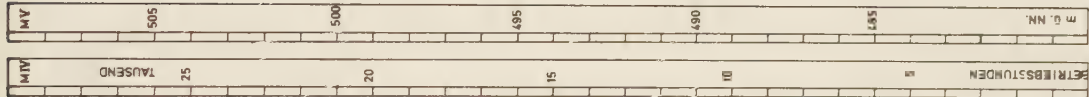
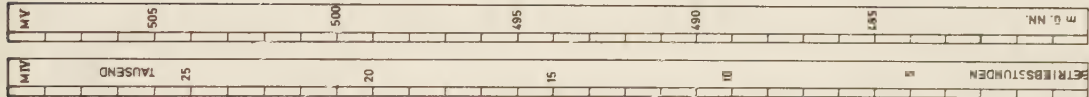
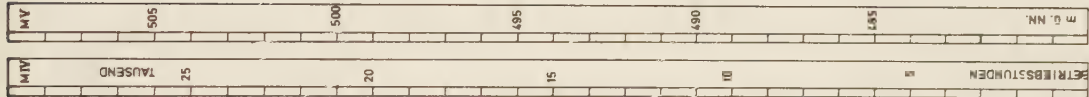
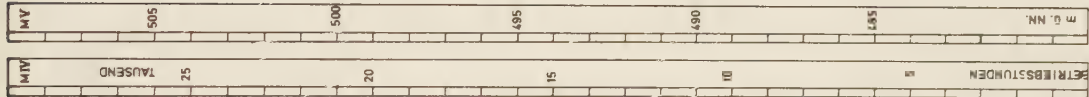
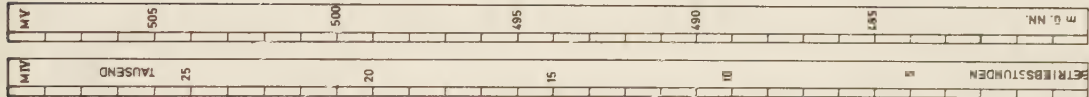
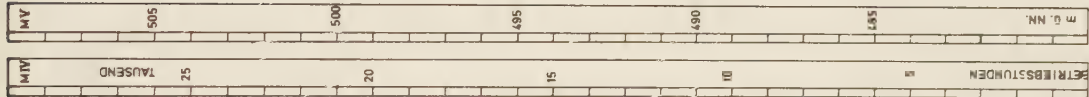
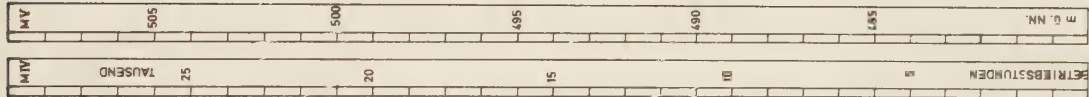
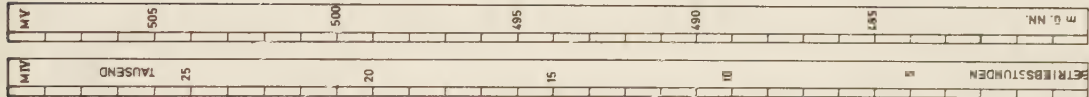
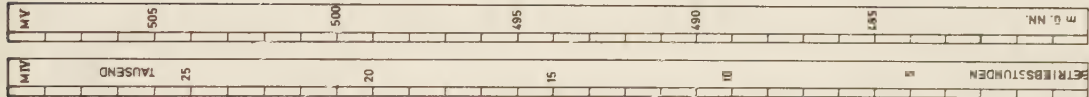
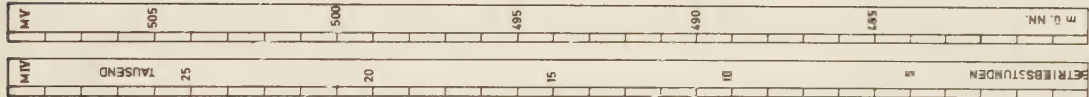
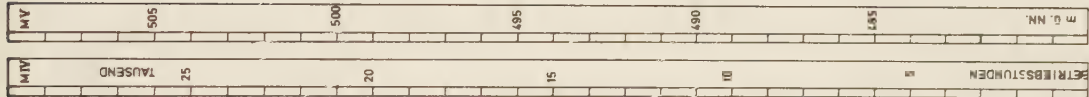
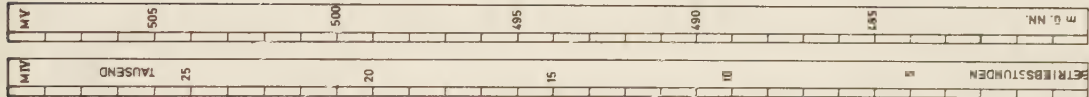
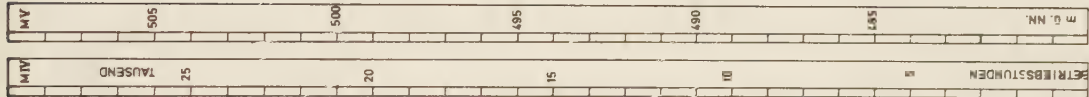
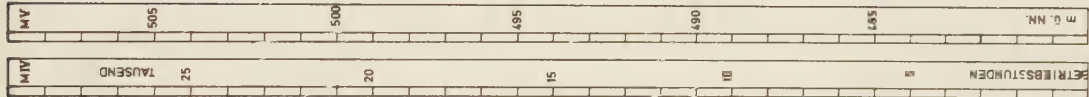
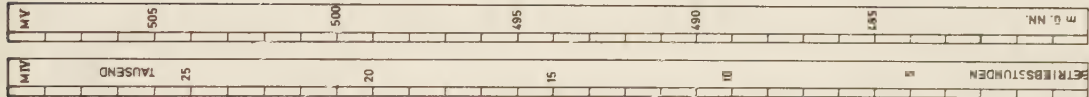
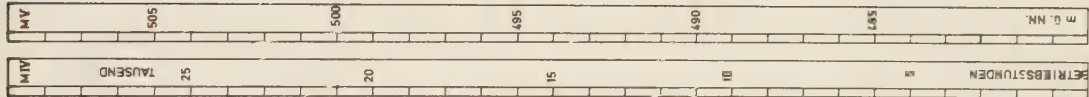
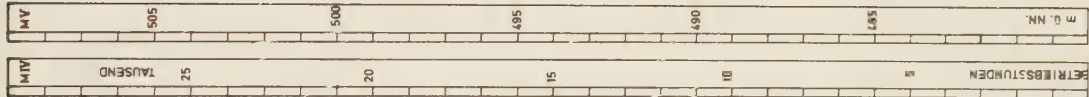
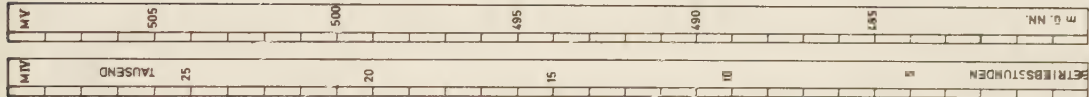
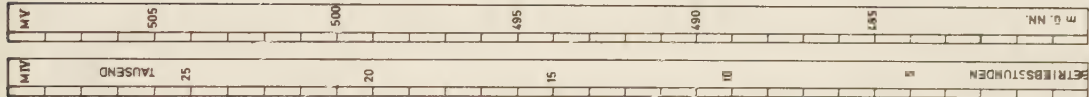
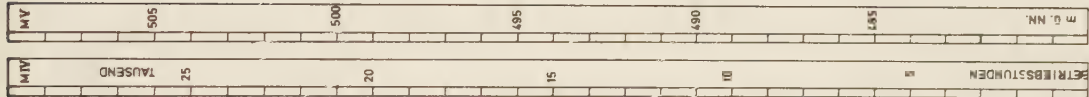
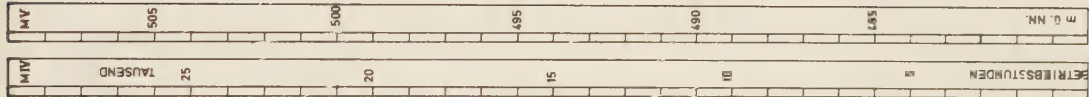
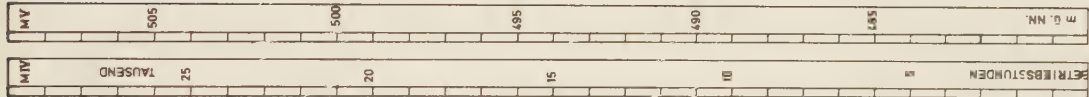
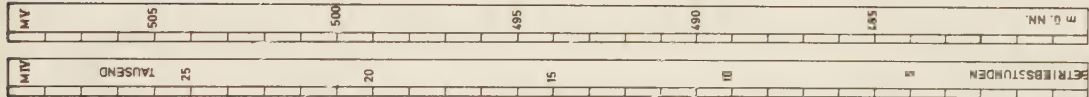
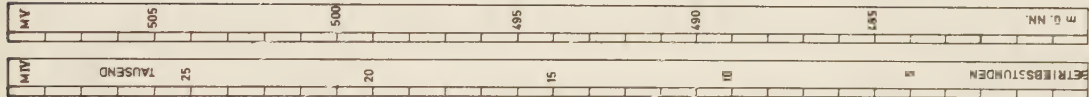
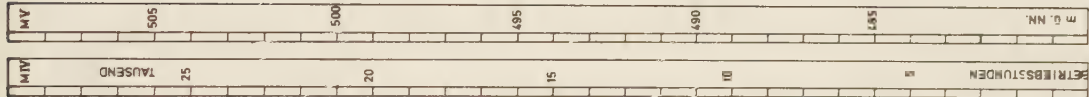
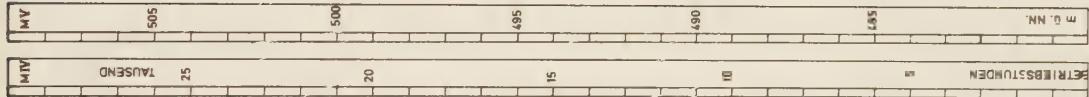
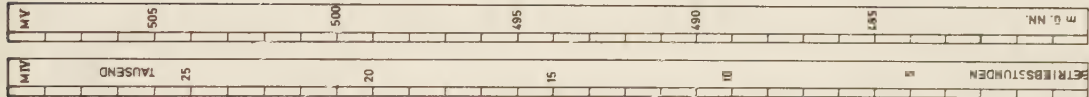
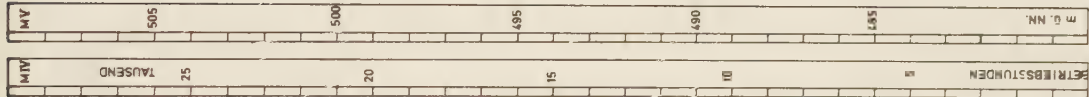
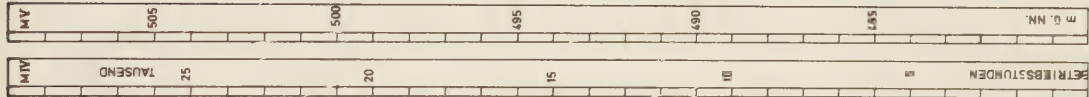
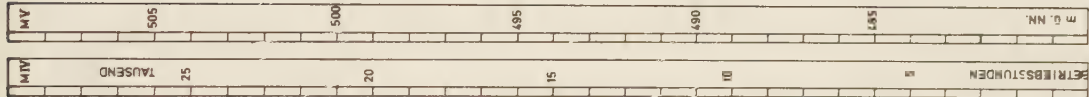
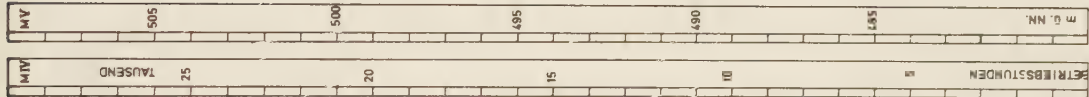
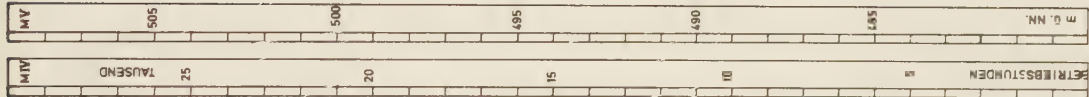
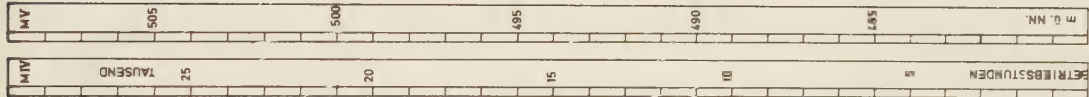
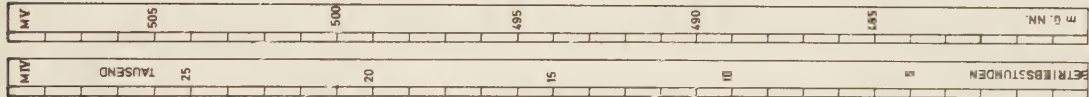
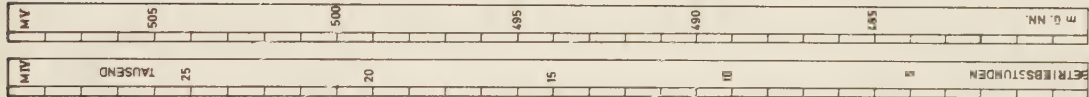
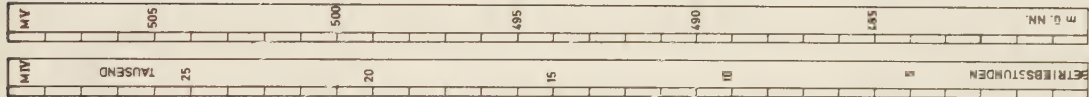
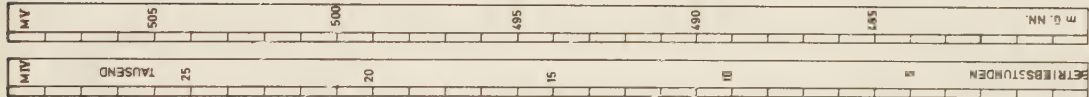
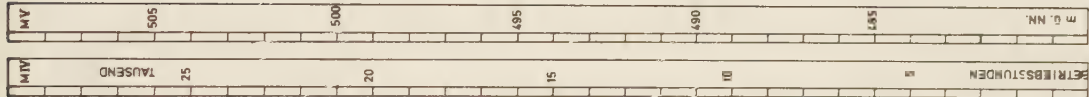
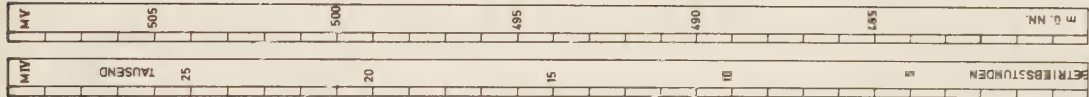
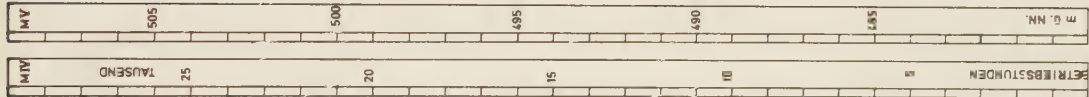
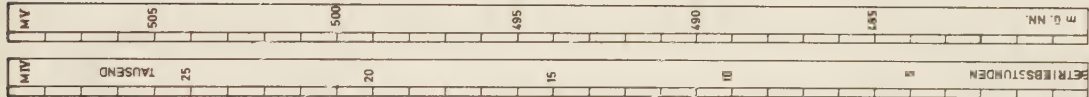
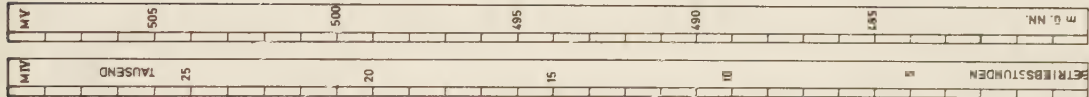
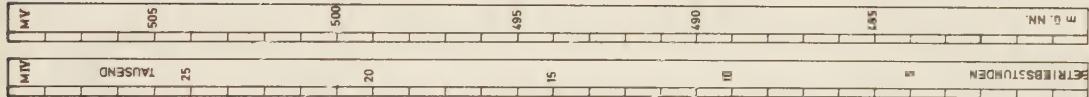
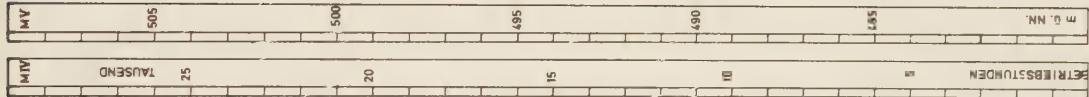
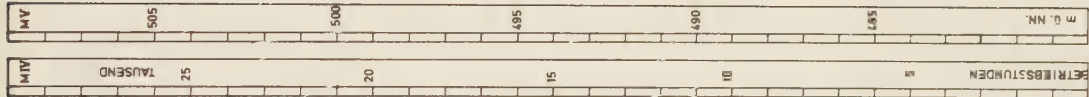
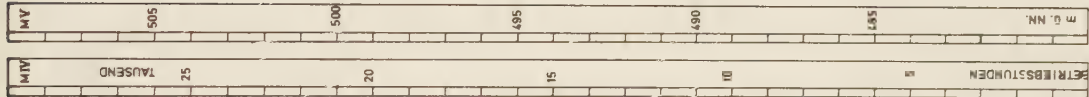
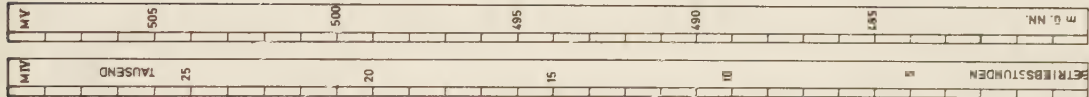
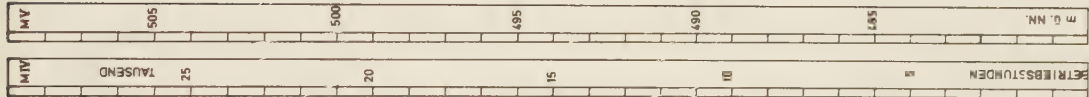
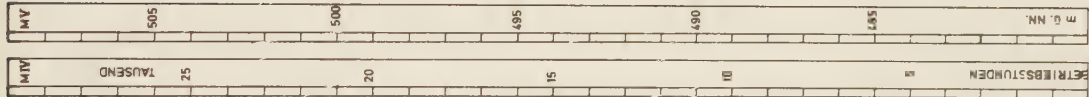
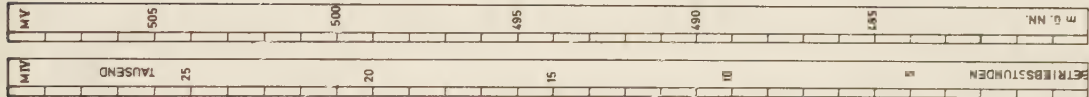
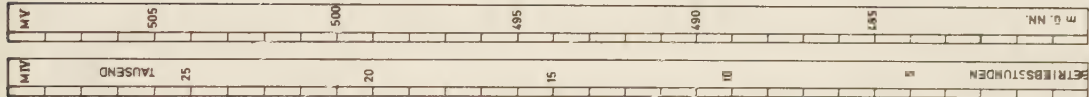
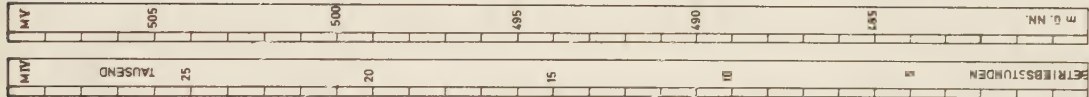
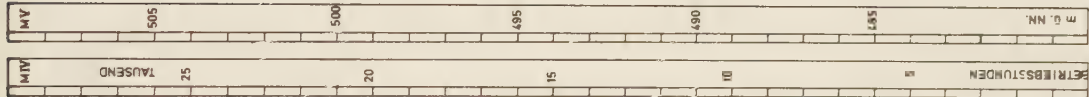
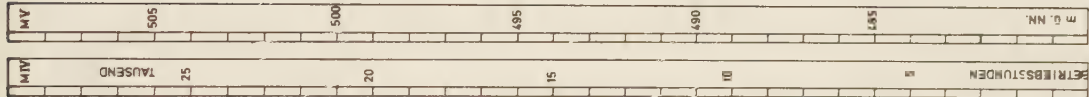
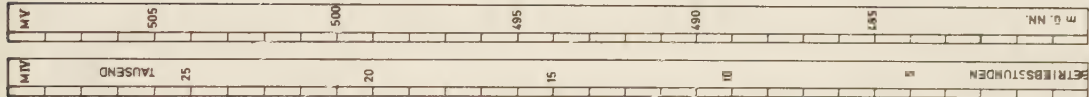
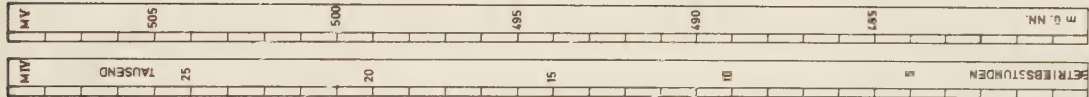
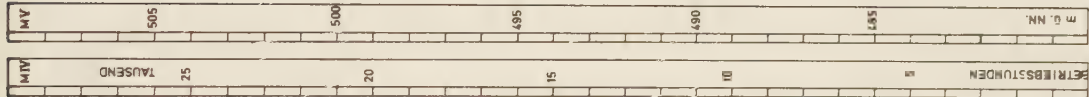
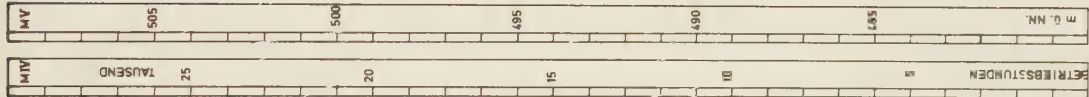
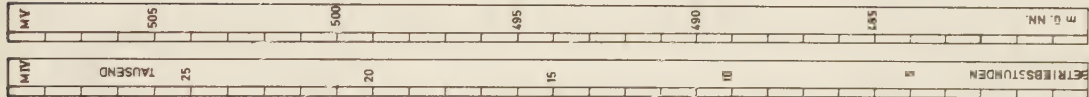
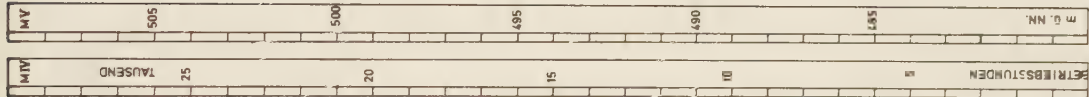
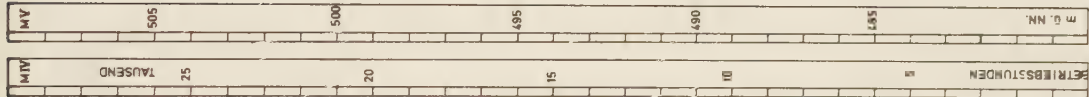
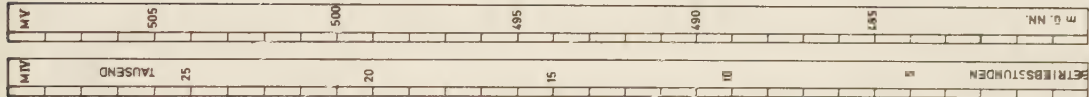
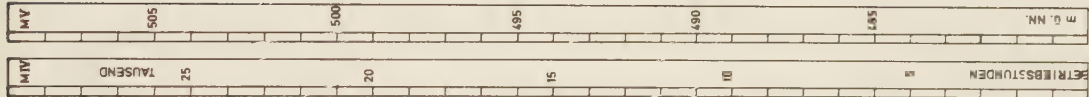
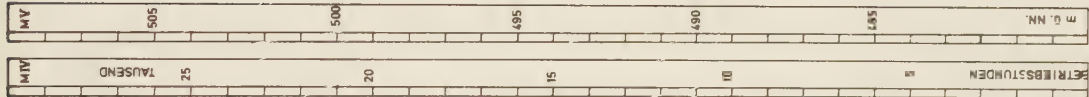
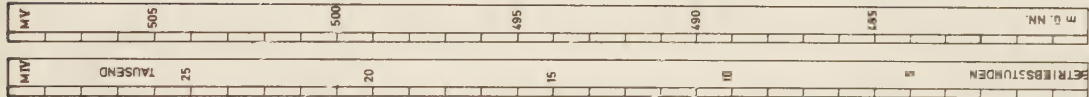
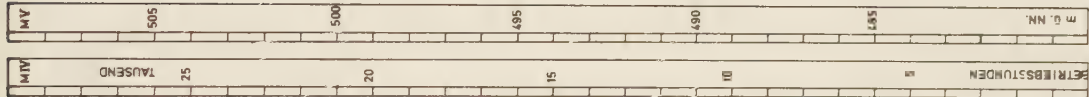
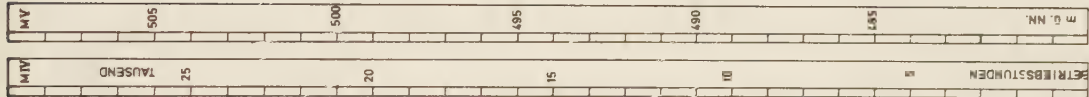
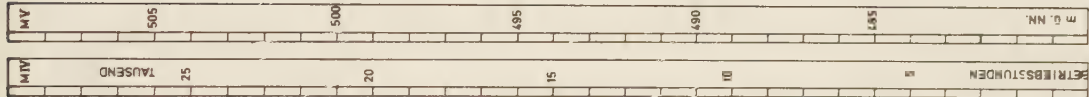
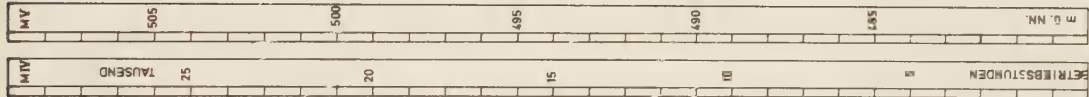
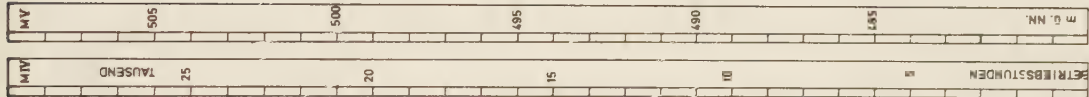
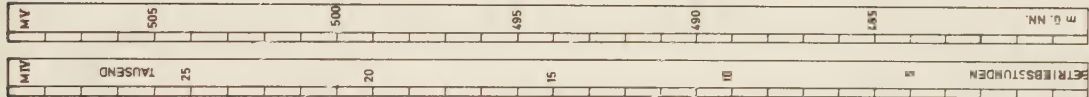
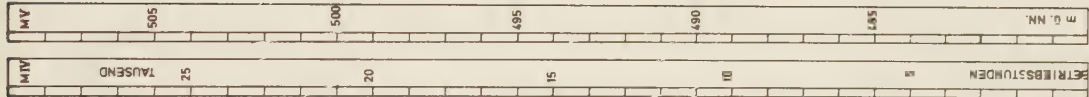
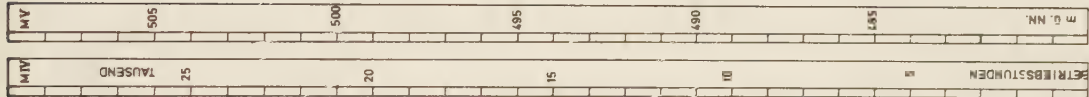
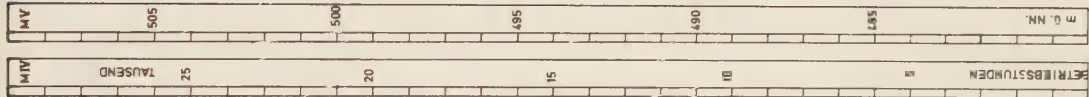
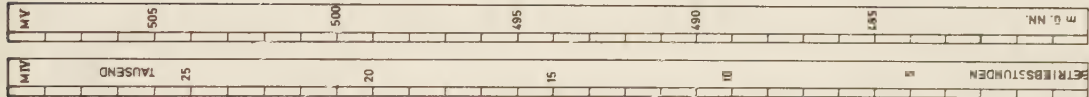
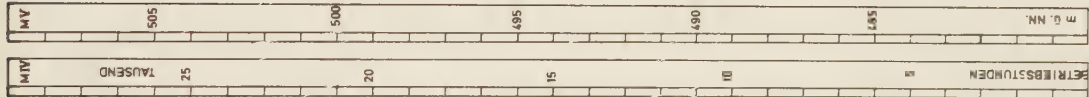
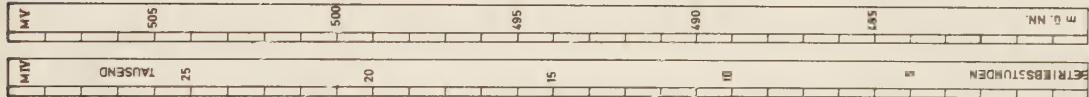
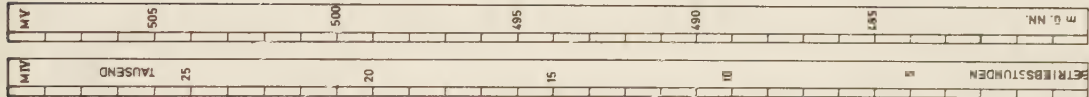
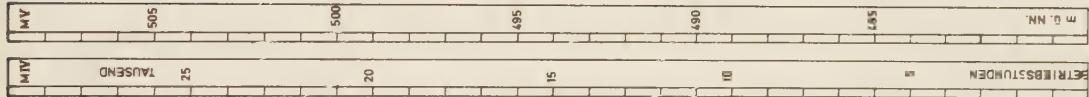
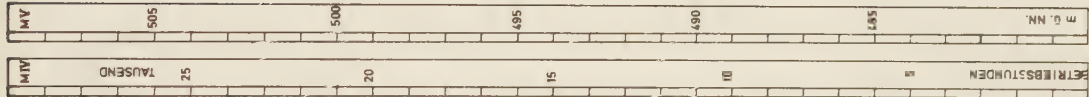
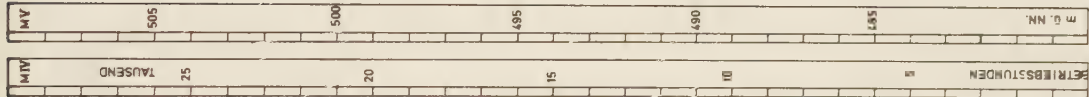
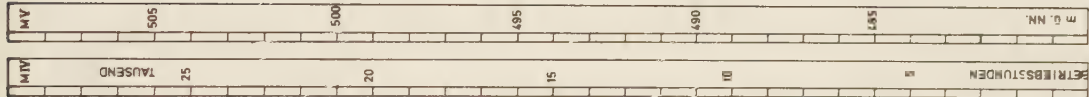
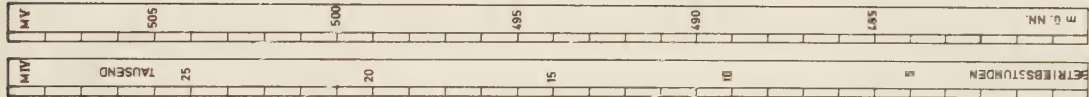
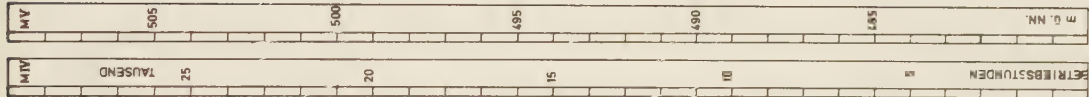
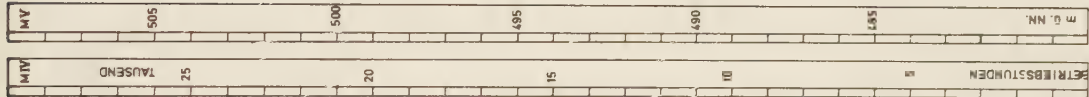
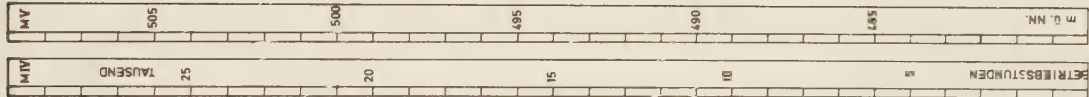
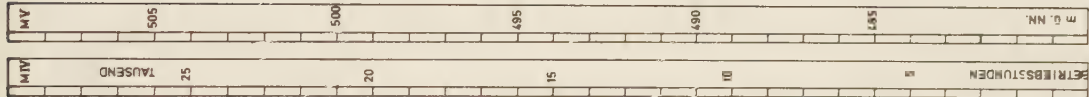
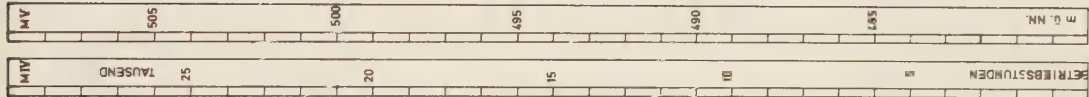
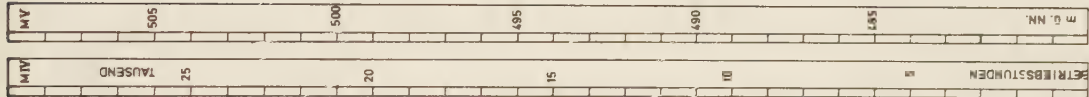
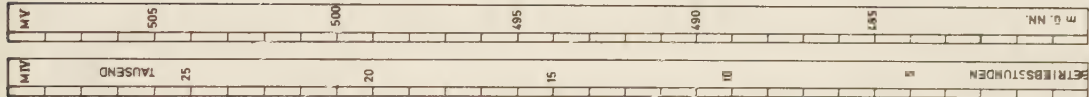
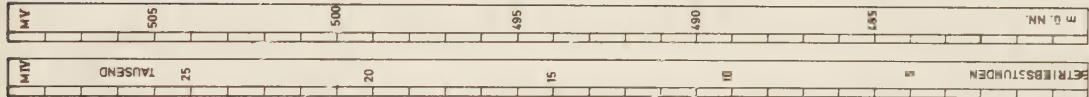
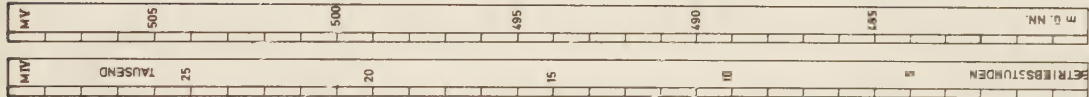
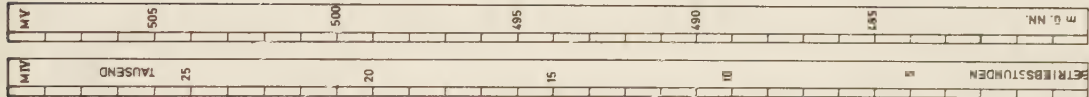
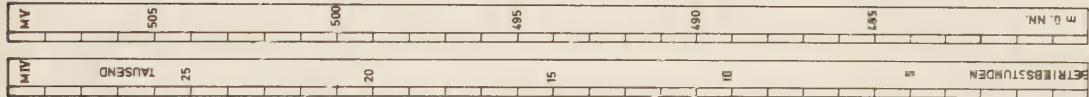
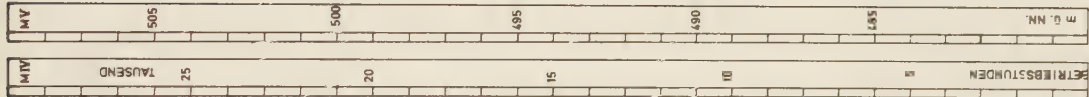
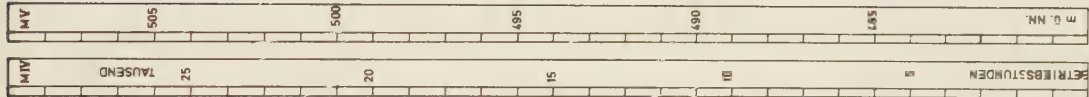
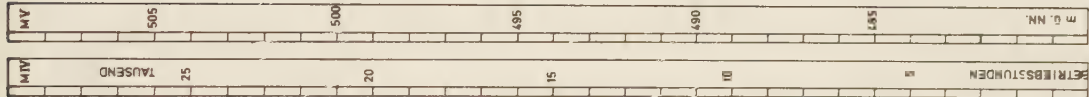
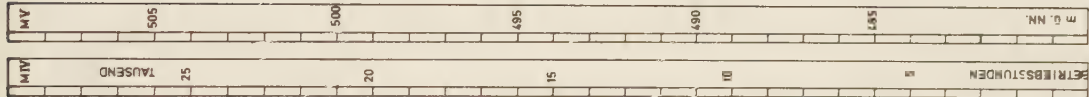
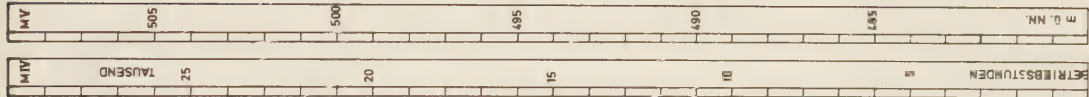
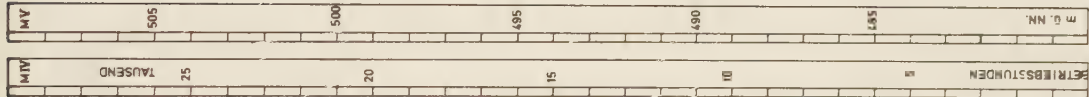
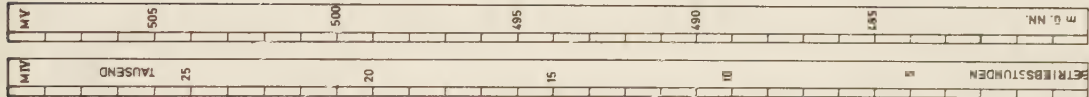
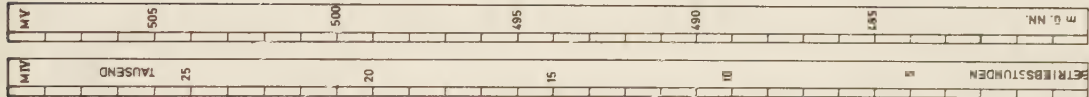
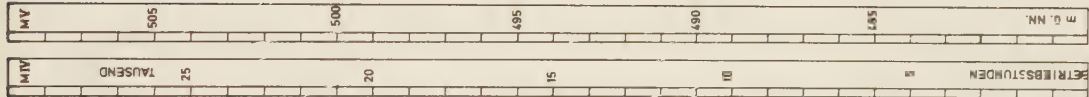
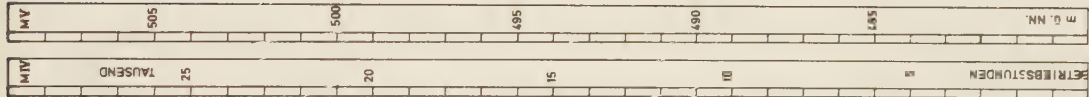
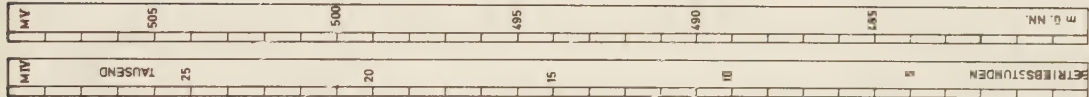
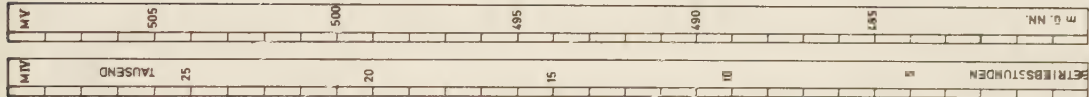
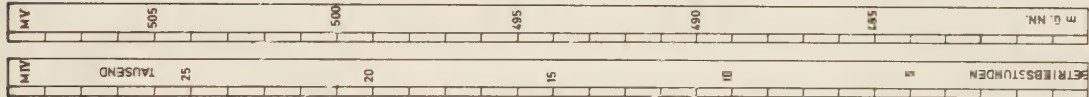
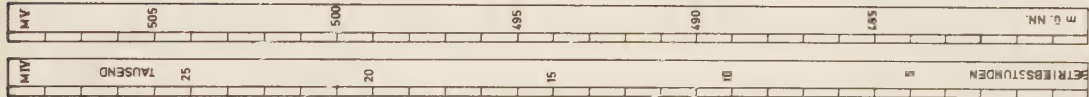
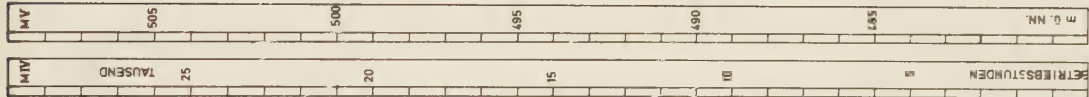
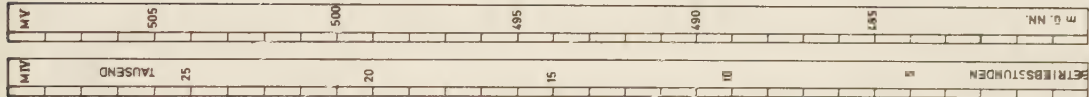
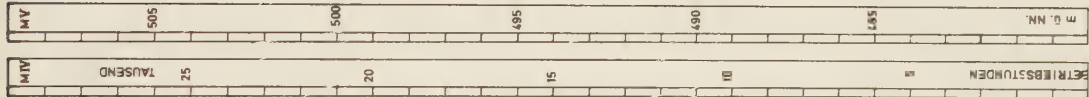
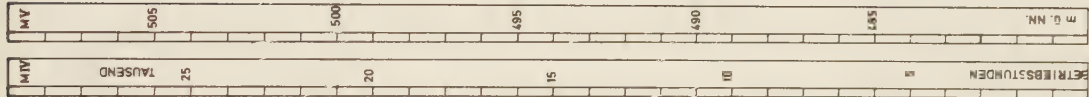
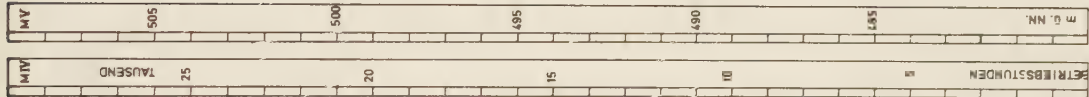
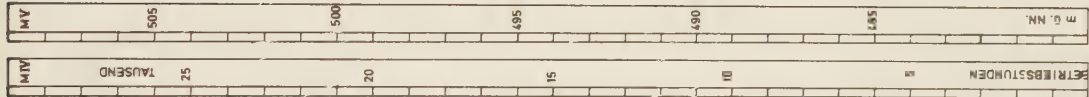
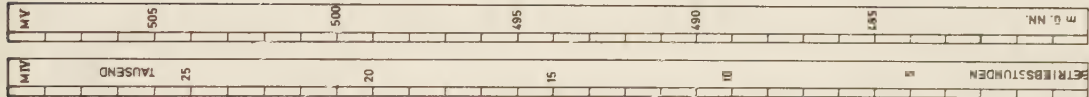
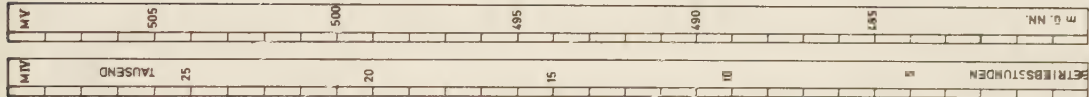
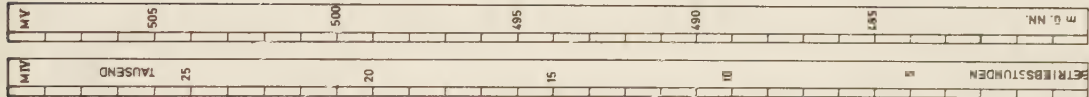
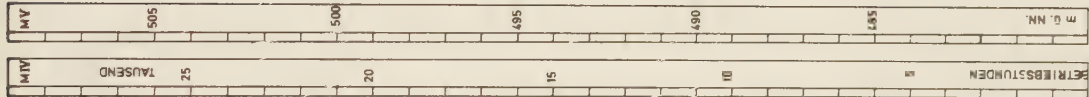
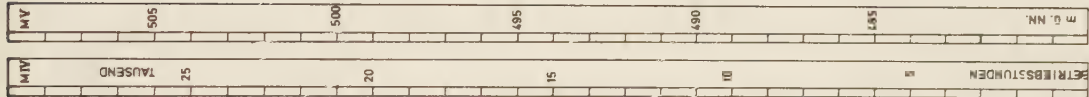
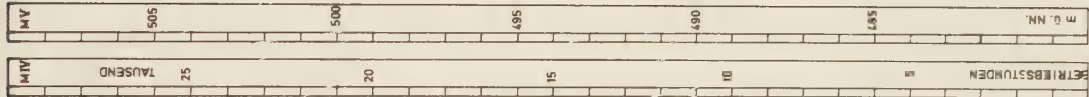
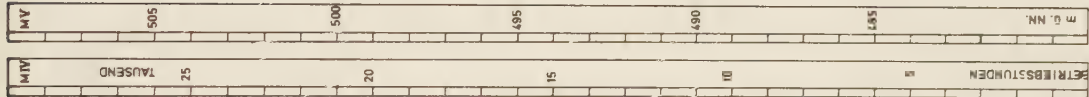
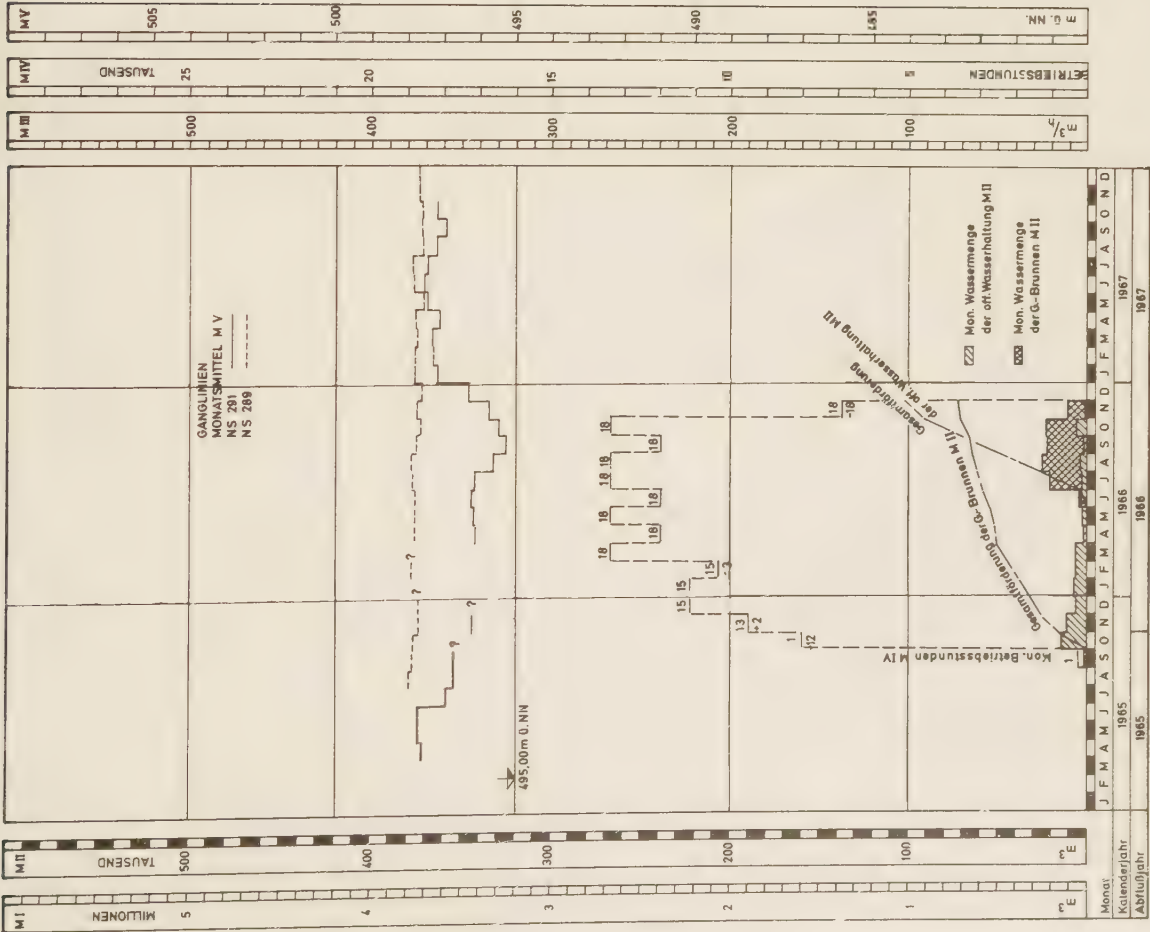


**GRUNDWASSERABSENKUNG:
BAULOS 3**

ABSENKKAUER 28.4.66-31.8.67
 GEF. WASSERMENGE D. MAX. 28G.-BRUNNEN 250017m³
 GEF. WASSERMENGE D. OFF. WASSERHALT. 70020 m³
 DARSTELLUNG DER BODENARTEN NACH DIN 4023



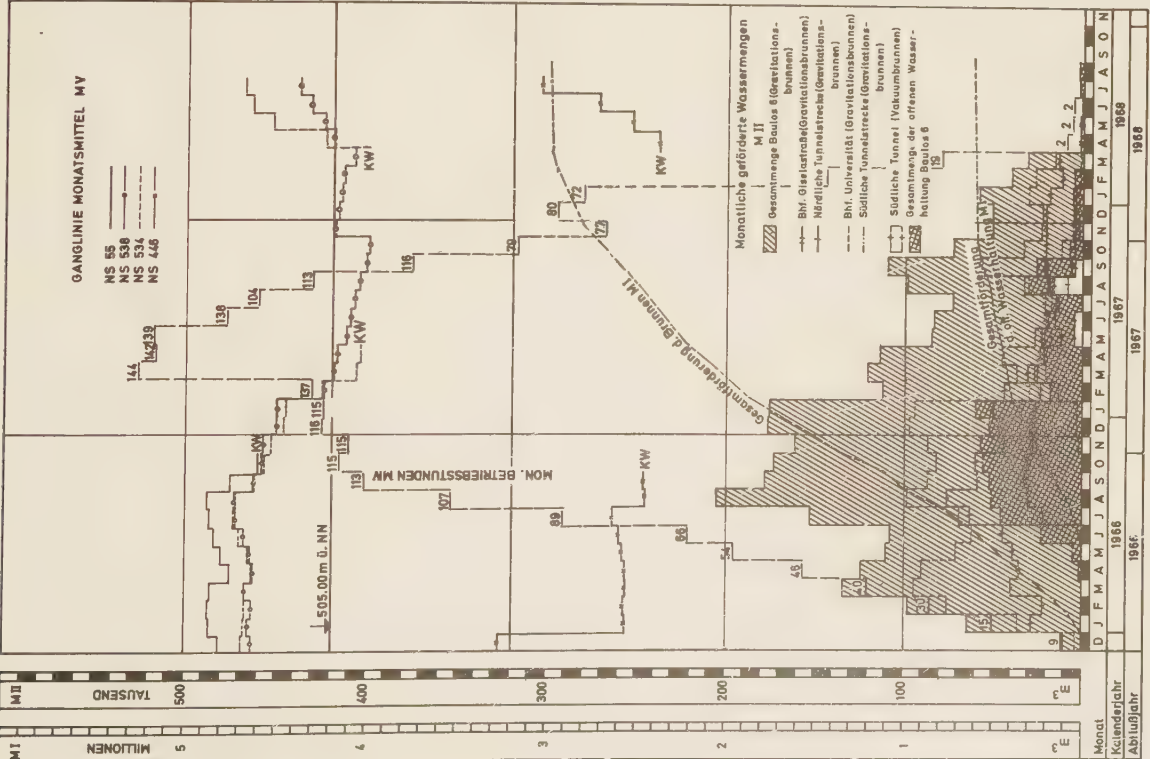
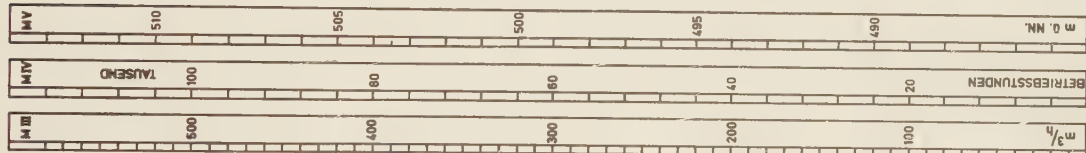
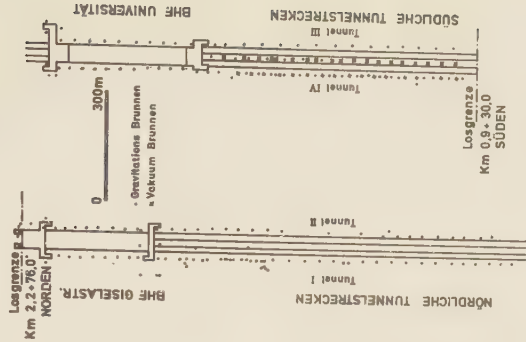
Tafel 37 "Absenkdiagramm" Baulos 3



GRUNDWASSERABSENKUNG: BAULOS 6

ABSENKDAUER: 17,12.65 - 30,6.68!*"
GEF. WASSERMENGE MAX. 14,4 G. - BRUNNEN: 2.954,3/2 m³
GEF. WASSERMENGE D. OFF. WASSERHALT.: 613,931 m³ -
GEF. WASSERMENGE D. MAX. 34 V. - BRUNNEN: 30.994 m³
DARSTELLUNG DER BODENWASSER NACH DIN 423
OFFNE WASSERHALTUNG IN BHF GISELSTR. NOCH IN BEFRAB, DA DIE NORDWAND
DES BHF. TEST VON DER BAUGRUPPE LOS 11. ERSTELLT WIRD.

ANORDNUNG DER BRUNNEN:



Tafel 39 "Absenkdigramm" Baulos 6

der ein deutliches Relief aufweist. In seinem Hangenden treten Aufarbeitungs- und Kieslagen auf (vgl. II, 4). Gerade im Bereich dieses Reliefs war daher die Grundwasserabsenkung durch schematisch angeordnete Gravitationsbrunnen nicht voll wirksam, da aus diesen Quarzkies- und Aufarbeitungslagen zum Teil noch erhebliche Wassermengen in die Baugrube einströmten, sofern die einzelnen gut durchlässigen Linsen nicht gerade von Brunnen getroffen wurden. Doch auch diese in die Baugrube eindringenden Wassermengen (Tab. 31) waren in der offenen Wasserhaltung ohne Schwierigkeiten zu beherrschen. Auf Grund der geschilderten hydrogeologischen Verhältnisse in diesem Baulos förderte die offene Wasserhaltung mehr Wasser als die geschlossene Wasserhaltung.

Die Verhältnisse der durch offene und durch geschlossene Wasserhaltung geförderten Wassermengen sind in Tabelle 32 für die Baulose angegeben, deren Wasserhaltung inzwischen beendet ist.

Tabelle 32 Vergleich der geförderten Wassermengen in der offenen und geschlossenen Wasserhaltung

Bau- los	Brunnen- anzahl	Dauer	Fördermengen der Brunnen (Grundwasser) (m ³)	Fördermengen der offenen Wasserhal- tung (Grundwasser u. Oberflächenwasser (m ³))
1	30	1.6.1965- 2.3.1967	4 229 138 = 100 %	81 705 = ca. 2.0 %
2	40	25.5.1965- 30.9.1966	1 858 815 = 100 %	22 040 = ca. 1.2 %
3	28	28.4.1966	2 500 117 = 100 %	70 010 = ca. 2.8 %
4	18	21. 9.1965- 16.11.1966	71 927 = 100 %	102 360 = ca. 142.2 %

Auch aus dem Tertiär können erhebliche Wassermengen gefördert werden; dies bestätigen die Baulose in der Innenstadt (Beilage 1, I: Baulos 9, 10 und 15), bei denen die quartären Schotter so geringmächtig sind, daß sie kein Grundwasser führen (Beilage 1, I und Tafel 20). In diesen Baulosen wurden bis zu ca. 900 000 m³ Wasser in neun Monaten gefördert. Im Baulos 10 betrug die maximale Gesamtförderung von 30 Brunnen bis zu 102 315 m³ pro Monat (vgl. Tafel 33).

Diese beachtlichen Wassermengen sind auf die relativ große Mächtigkeit der durchteuften Sandschichten (Beilage 1, I und Tafel 20), und auf das gespannte Grundwasser dieser Sande zurückzuführen.

Aus dem Diagramm des Bauloses 6 (Tafel 39) kann der Anteil der durch Vakuumgroßbrunnen geförderten Wassermenge an der Gesamtförderung aller Brunnen und der offenen Wasserhaltung entnommen werden. Es zeigt sich deutlich, daß die Vakuumgroßbrunnen wirklich nur "Restwasser" fördern. In der nachfolgenden Tabelle 33 sind die Ergebnisse der Grundwasserabsenkung der südlichen Tunnelstrecke im Baulos 6 nach einer Rechnung der örtlichen Bauleitung aufgeführt: setzt man die Werte der Vakuumwasserhaltung = 1, so ergeben sich anschauliche Verhältniszahlen.

Tabelle 33 Verhältniszahlen für die geförderten Wassermengen und Betriebszeiten der Vakuumwasserhaltung und der Gravitationsbrunnen der südlichen Tunnelstrecke des Bauloses 6

	Vakuumgroßbrunnen (34)	Gravitationsbrunnen (45)	Verhältnis
Betriebsstunden (h)	16 034 = 1	336 204	1 : 21
Gesamtwassermenge (m ³)	30 994 = 1	226 301	1 : 7.3
Mittelwert der Förderung (m ³ /h)	1,993 = 1	0,674	1 : 0.337

5. Einfluß des Bauwerks auf die Grundwasserströmung

Nur im Norden (Tafel 18, Baulos 1, 2, 3 und 4) ist der Rohbau des U-Bahn-Bauwerkes zur Zeit schon fertiggestellt. Dieser Bereich ist in der Tafel 18 daher auch für einen Zustand nach Beendigung der Grundwasserabsenkung in Grundwasserhöhengleichen dargestellt. Es zeigt sich, daß die generelle Grundwasserbewegungsrichtung durch das Bauwerk praktisch nicht geändert wird. Dies hat einmal seine Ursache in den natürlichen Gegebenheiten: der Druckausgleich im Grundwasser kann über die Tertiärsande erfolgen, sofern sie zum oberen Grundwasserstockwerk gehören (vgl. III. 1.2). Zum zweiten verhindern die hier in

einem Abstand von 20 bis 30 Meter längs des Bauwerkes angebrachten Düker einen unerwünschten Grundwasserstau. Diese Maßnahmen werden auch dadurch noch unterstützt, daß die Zwischenräume zwischen Bauwerkswand und ursprünglicher Baugrubenaussteifung nur mit kiesigem, gut durchlässigem Material verfüllt werden. Die Tunnel der im Schildvortrieb aufgefahrenen Strecken liegen vollständig im Tertiär (Beilage 1, I; Beilage 2, I; Tafeln 19 und 20) . Diese Tunnel können von dem Grundwasser in den quartären Schottern überflutet werden; es wurden hier keine Düker unter den Bauwerken eingebaut.

Aus der Tafel 18 läßt sich auch ableiten, daß das Grundwassergefälle, das vor Baubeginn in dieser Gegend in der Regel zwischen 3 und 6 ‰ lag, sich durch den U-Bahn-Bau praktisch nicht geändert hat. Die Wasserstände in den Pegeln westlich und östlich der Trasse stellen sich wieder auf das normale Grundwassergefälle ein.

Die Grundwasserabsenkung wurde jeweils dann eingestellt, wenn die Wiederauffüllung über den Tunnelstrecken so mächtig ist, daß die Bauwerke auftriebsicher sind. Die Brunnen wurden sodann in Etappen abgeschaltet, um einen langsamen und stetigen Anstieg des Grundwassers zu ermöglichen. Der Wiederanstieg wurde in den abgeschalteten Brunnen beobachtet. Die Tabelle 34 zeigt den Wiederanstieg zweier zu beiden Seiten des Tunnels liegenden Brunnen im Baulos 4. Die Grundwasserstände spiegeln sich zu jedem Zeitpunkt nach demselben Niveau aus, der Anstieg erfolgt praktisch synchron.

Tabelle 34 Wiederanstieg des Grundwassers in zwei abgeschalteten Brunnen des Bauloses 4

Datum	Brunnen 2 m NN	Brunnen 12 m NN
16.11.66	487.56	488.50
17.11.66	494.64	494.65
18.11.66	494.71	494.72
21.11.66	495.06	495.09
22.11.66	494.15	495.17
25.11.66	495.49	495.51
28.11.66	495.79	495.69
29.11.66	495.88	495.78

Aus Tabelle 34 geht auch hervor, daß der Wiederanstieg des Grundwassers relativ rasch erfolgt: innerhalb der ersten 24 Stunden stieg das Wasser um 7.08 m bzw. um 6.15 m, danach betrug der Anstieg nur noch Dezimeter. Ein anderer Brunnen desselben Bauloses wurde nach dem Abschalten stündlich beobachtet. Er stieg in 24 Stunden nur um 3.55 m an, da seine benachbarten Brunnen zum Zeitpunkt der Beobachtung noch in Betrieb waren. Bei der Beobachtung zeigte sich, daß sich der Wasserstand im Brunnen schon nach einer Stunde um 3.20 m erhöht hatte.

V. Zusammenfassung

Geologische Verhältnisse

1. Durch den Bau der Münchner U-Bahn werden die quartären und jungtertiären Schichten im Untergrund des Stadtgebietes in einmaliger Weise erschlossen.

Die Nord-Süd-U-Bahn-Trasse schneidet zwischen Freimann und Goetheplatz die Schotter der fluvioglazialen, spätwürmeiszeitlichen Altstadtstufe und die limnofluviatilen Sedimente der Oberen Süßwassermolasse an.

Die Olympia-U-Bahn-Trasse zwischen Münchner Freiheit und Oberwiesenfeld erfaßt in der Gegend des Oberwiesenfelds zudem die Schotter der rißeiszeitlichen Hochterrasse und der würmeiszeitlichen Niederterrasse.

2. Die quartären Sedimente bestehen zum überwiegenden Teil aus mittel- bis grobkörnigen Kiesen.

Die jungtertiären Sedimente bestehen aus zwei Haupttypen; aus den sog. Flinzsand und aus den Flinzmergeln. Zwischen diesen beiden Sedimenttypen gibt es alle nur möglichen Mischungsverhältnisse zwischen Sand und Ton.

Die Haupttypen der jungtertiären Sedimente zeigen so eindeutige sedimentpetrographische, bodenmechanische und geotechnische Eigenschaften, daß sie in der Baugrube und an Bodenproben einwandfrei erkannt werden können.

3. Die Flinzsande haben ein deutliches Gefüge: neben ausgeprägten Schräg- und Kreuzschichtungen finden sich Horizontalschichtungen, schichtinterne Fältelungserscheinungen und bioturbate Wühlgefüge. Die unterschiedliche Korngrößenverteilung und die verschiedenen Arten des Gefüges bestimmen die geotechnischen und hydrologischen Eigenschaften der Flinzsande.
4. Die jungtertiären Sedimente längs der Nord-Süd-Trasse lassen sich durch drei mächtige Flinzmergelhorizonte gliedern. Die Grenze der quartären Schotter gegen die jungtertiären Sedimente weist ein unruhiges Erosionsrelief auf. Stellenweise haben sich die quartären Schotter sogar rinnenartig in den tertiären Untergrund eingeschnitten.

Grundwasserverhältnisse

1. Im Untergrund von München sind durch Bohrungen mehrere Grundwasserstockwerke nachgewiesen.

Das obere Grundwasserstockwerk liegt im allgemeinen in den durchlässigen Schottern des Quartärs und zum Teil auch noch in den unmittelbar darunterliegenden, meist gering durchlässigen Flinzsanden.

Es besteht also stellenweise aus zwei in ihren Durchlässigkeiten und in ihren Ergiebigkeiten völlig verschiedenen Grundwasserleitern.

Die Grundwassermächtigkeiten sind in Abhängigkeit von der unterschiedlichen Tiefenlage des Grundwasserstauers (Flinzmergel) sehr verschieden. Örtlich können stauende Flinzmergelschichten die Grundwasseroberfläche kuppenartig überragen, abdecken oder abschirmen.

Weitere Grundwasserstockwerke liegen in jenen Flinzsandpaketen, die durch undurchlässige Flinzmergelschichten von den darüberliegenden Grundwasserstockwerken getrennt sind. Solche Flinzsande führen fast immer gespanntes Grundwasser; ihre Druckspiegel unterscheiden sich in den Höhenlagen.

Zwischen den einzelnen Grundwasserstockwerken bestehen natürliche oder künstlich entstandene Verbindungen.

2. Langjährige Beobachtungen des Grundwasserstandes im oberen Grundwasserstockwerk des Münchner Stadtgebietes zeigen, daß sich infolge örtlicher künstlicher Beeinflussung nicht jener Grundwassergang einstellt, wie er von den unbeeinflussten Pegeln in der Schotterebene bekannt ist. Auffallend ist, daß sich im Stadtgebiet besondere hydrologische Phänomene, wie z. B. außergewöhnliche Grundwasserhochstände, nicht auswirken. Anscheinend sind die dichte Bebauung und die Nähe des Vorfluters wirksamere Faktoren für die Höhe des Grundwasserstandes, als es die Niederschläge sind.

Die zunehmende Besiedlung im Stadtgebiet, die Isarregulierung und die ständige Grundwasserentnahme durch private Wasserversorgungen führten im Laufe der Zeit zu einer allgemeinen Grundwasserabsenkung im Stadtbereich von München.

3. Die Filtergeschwindigkeiten v_f in den Grundwasserleitern zeigen, der unterschiedlichen Kornverteilung der Sedimente entsprechend, beachtliche Unterschiede. In den quartären Schottern liegen die v_f -Werte zwischen 0.30 und 13.00 m/Tag, in den Flinzsanden in der Regel zwischen 0.01 und 0.70 m/Tag.
4. Die Durchlässigkeitsbeiwerte für die einzelnen Sedimente wurden nach verschiedenen Methoden gewonnen. Sowohl die indirekte Bestimmung des k -Wertes, als auch die direkte Bestimmung durch die radiohydrometrische Methode und andere Feldversuche liefern reproduzierbare und repräsentative Werte für die jeweiligen Grundwasserleiter. Die Ermittlung der k -Werte ist so hinreichend genau, daß sie eine zuverlässige Grundlage geben für die Baubeschreibung, für die geotechnische Beurteilung der Grundwasserverhältnisse überhaupt und damit für die Maßnahmen der Wasserhaltung.

Die Werte für die Durchlässigkeit liegen für die quartären Schotter zwischen $2 \cdot 10^{-4}$ und $4.6 \cdot 10^{-2}$ m/s, für die Flinzsande zwischen $0.2 \cdot 10^{-8}$ und $2.8 \cdot 10^{-4}$ m/s.

5. Es ist schwer, für das Grundwassergefälle I im oberen Grundwasserstockwerk genaue Werte anzugeben. Selbst bei der eingehenden Vorerhebung im Rahmen des U-Bahn-Projektes liegen die Grundwasserpegel immer noch so weit auseinander, daß mit ihrer Hilfe das Gefälle für einzelne Teilbereiche nicht so genau bestimmt werden konnte, wie es die ingenieurgeologischen Erfordernisse verlangten. Wenn sich auch für die quartären Schotter Werte zwischen 2 und 5 ‰ und für die Flinzsande zwischen 4 und 8 ‰ ergeben,

so zeigt sich doch, daß in Teilbereichen, bedingt durch die Inhomogenitäten des Untergrundes, erhebliche Abweichungen von diesen Werten möglich sind.

6. Die lokalen Fließrichtungen des Grundwassers werden jeweils von einem einzigen Pegel allein aus bestimmt; sie entsprechen in der Regel in den quartären Schottern angenähert der Grundwasserbewegungsrichtung, die sich als Normale auf die Grundwasserhöhengleichen konstruieren läßt.

Im Grundwasser liegende Tiefbauten, Entnahmetrichter von Brunnen oder Unregelmäßigkeiten der Tertiäroberfläche können Abweichungen von der ermittelten Normrichtung bewirken.

Setzt sich das obere Grundwasserstockwerk aus zwei verschiedenen Grundwasserleitern, aus Sand und Kies, zusammen, so kann die lokale Fließrichtung im Sand erheblich von der im darüberliegenden Kies abweichen, wenn in der Nähe liegende Quartärrinnen als Drainagen wirken.

Die lokalen Fließrichtungen des Grundwassers zeigen nicht nur örtliche, sondern auch zeitliche Veränderungen, die meist durch künstliche Beeinflussung bedingt sind.

In den tieferen Grundwasserstockwerken unterscheidet sich die lokale Fließrichtung z.T. erheblich von der im oberen Grundwasserstockwerk.

7. Die Grundwasser des Münchner Stadtgebietes sind im chemischen Sinne "Gleichgewichtswässer" (freie Kohlensäure = zugehörige Kohlensäure). Sie enthalten im oberen Grundwasserstockwerk z.T. viel Nitrat, Chlorid und Sulfat. Ihre Gesamthärte ist höher als die Karbonathärte.

Die Grundwasser der tieferen Stockwerke haben auffällig hohe Alkaligehalte (scheinbare Karbonathärte) und höhere Kieselsäuregehalte. Die Tiefenwässer sind meist "reduzierte Wässer" (= sauerstoffarm).

Die im Baubereich erfaßten Grundwasser sind nicht betonaggressiv. Der Grundwasserchemismus schwankt örtlich und zeitlich.

8. Die Grundwassertemperaturen im oberen Grundwasserstockwerk weisen einen jahreszeitlichen Gang auf, dessen Schwankung von der Teufe und der Ausbildung des Grundwasserleiters abhängig ist. Die Grundwassertemperaturen der tieferen Grundwasserstockwerke weisen kaum eine jahreszeitliche Schwankung auf.

Geotechnische Verhältnisse

1. Die Untergrundverhältnisse Münchens lassen die offene und die bergmännische Bauweise beim U-Bahn-Bau zu. Wird auf einer Strecke eine bestimmte Bauweise bevorzugt, so liegt dies im allgemeinen nur daran, ob die raumverbrauchende offene Baugrube möglich ist oder nicht. Im allgemeinen wird in offenen Baugruben dort gearbeitet, wo breite, nicht überbaute, verkehrsarme Streckenteile vorliegen.
2. Die quartären und tertiären Sedimente lassen sich nach ihren Lösbarkeiten und ihren bautechnischen Eigenschaften klassifizieren. Es ergeben sich für den Erdaushub ohne Schwierigkeiten Abrechnungsgruppen, die den in den Baugruben erkennbaren Sedimenttypen entsprechen.

3. Die Flinzsande sind auf Grund ihrer Materialeigenschaften keine "instabilen Sande", d.h. sie geraten auf Grund ihrer Materialeigenschaften (Körnung, Porenanteil, Lagerungsdichte) ohne äußeren Anlaß von sich aus nicht ins Fließen. Sie neigen aber - wie jedes feinklastische Sediment - soferne sie Grundwasser führen, nicht ausreichend entspannt oder entwässert sind, unabhängig von ihrer Ausbildung, beim Anschnitt in der Baugrube zum Fließen.
4. Die Grundwasserabsenkung und die Entwässerung des Gebirges erfolgt beim Münchner U-Bahn-Bau im wesentlichen durch die geschlossene Wasserhaltung (Gravitationsbrunnen und z. T. Vakuumgroßbrunnen), die durch die offene Wasserhaltung in den Baugruben (Drainagen und Pumpensümpfe) unterstützt wird.

Den quartären Schottern und den Flinzsandten der verschiedenen Grundwasserstockwerke wird durch die Absenkung Grundwasser entzogen. Die Grundwasseroberfläche der einzelnen Grundwasserstockwerke wird verschieden stark abgesenkt.

Stehen in der Höhe der Aushubsohle der Baugruben oder der Stollen grundwasserführende Schichten (Kiese oder Sande) in ausreichender Mächtigkeit an, so wird die Baugrube durch die Wirkung der Gravitationsbrunnen im wesentlichen trockengehalten. Liegt aber im Bereich der Baugrube oder dicht darunter eine undurchlässige Mergelschicht, so ist die Entwässerung meist nicht vollständig, weil über der Mergelschicht in den Räumen zwischen den Gravitationsbrunnen das sog. Restwasser stehenbleibt. Bei offenen Baugruben wird in solchen Fällen eine offene Wasserhaltung betrieben, bei Schildstrecken wird eine zusätzliche Vakuumwassererhaltung notwendig.

5. Der Einfluß der Grundwasserabsenkung wirkt sich in den verschiedenen Grundwasserstockwerken und Grundwasserleitern, je nach Mächtigkeit des Grundwassers, nach den Durchlässigkeiten der Grundwasserleiter und nach der Druckhöhe bei gespannten Grundwässern, ganz verschieden aus. Während die Auswirkung im oberen Grundwasserstockwerk mit freier Oberfläche im Normalfall 100 m, in Rinnen 800 m, nicht übersteigen, lassen sich die Druckspiegelniedrigungen tieferer Grundwasserstockwerke noch in 1200 m Entfernung feststellen.
6. Die hohe Lagerungsdichte (D) der Flinzsande und die hohen Zustandszahlen (k_w) der Flinzmergel bewirken, daß sich die jungtertiären Sedimente durch die Grundwasserabsenkung (fehlender Auftrieb) nur unerheblich und im unmittelbaren Baustellenbereich setzen.

Örtliche Setzungen, die durch Erosionserscheinungen in den jungtertiären Sanden entstehen können, sind weitaus unangenehmer, denn "Restwasser" führen unter der Vorflutwirkung einer Baugrube oder eines noch ungedichteten Tunnels zur Bildung von Erosionskavernen, die im allgemeinen an der Grenze Flinzsand/Flinzmergel durch Ausspülung und Nachbrechen der Sande entstehen. Die Größe dieser inneren Erosion hängt vom hydraulischen Gefälle, von der Menge des eindringenden Wassers und von den Vorflutverhältnissen, d.h. von den Eintrittsquerschnitten ab. Je nach den örtlichen Verhältnissen sind daher besondere bautechnische Maßnahmen gegen eine solche innere Erosion erforderlich.

7. Bestimmend für die Leistung der einzelnen Gravitationsbrunnen sind die durchörterten und verfilterten Grundwassermächtigkeiten in den gut durchlässigen Schottern. In den Rinnen wurden Brunnenleistungen bis 15 l/s erreicht. Gravitationsbrunnen, die nur aus den jungtertiären Sedimenten fördern, ergaben zeitweise Fördermengen bis 5.5 l/s, sofern sie Grundwasserstockwerke mit gespanntem Grundwasser durchteuften. Erfassten sie nur ungespanntes Grundwasser, so lagen ihre Leistungen in der Regel unter 1 l/s.

Die nur kurze Zeit laufenden Vakuumgroßbrunnen, die lediglich das Restwasser aus den tertiären Sanden abpumpten, brachten mit 0.5 - 2.0 l/s die drei- bis fünffache Fördermenge entsprechender Brunnen im Schwerkraftbetrieb.

8. Die Wassermengen, die in den einzelnen Baulosen durch die Wasserhaltungen während der jeweiligen Absenkezeit gefördert werden, sind von den örtlichen hydrologischen Verhältnissen abhängig und daher sehr unterschiedlich.
9. Entgegen ursprünglich anderen Auffassungen ist die Grundwasserabsenkung beim Münchner U-Bahn-Bau in der geschilderten Weise notwendig, um die Baugruben und die Stollen in ausreichendem Maß trocken zu halten. Sie ist aber vor allem erforderlich zur Entwässerung der Flinsande. Diese haben nämlich die unangenehme Eigenschaft, beim Austritt ihres Eigenwassers schwimmsandähnliche Erscheinungen zu zeigen, Erosionskavernen zu bilden oder sogar zum Grundbruch zu neigen.
10. Die fertiggestellten U-Bahn-Tunnel beeinflussen auch dort, wo sie die Grundwasseroberfläche des oberen Grundwasserstockwerks überragen, den Grundwasserstand und die Grundwasserbewegungsrichtung nicht. Die natürliche Wasserwegigkeit des Untergrundes, in dem sie liegen, und örtlich zusätzliche Düker stellen das frühere hydrologische Regime wieder her und es bilden sich trotz des großen und durchgehenden Bauwerkskörpers wieder die normalen Grundwassergefälle aus.
11. Trotz der verschiedenen Ausbildung des Untergrundes im Vertikal- und Horizontalprofil, trotz der schwankenden geotechnischen Eigenschaften der jungtertiären Sedimente und trotz der recht unterschiedlichen Grundwasserverhältnisse stellt der Münchner Untergrund für den U-Bahn-Bau einen guten und erfaßbaren Baugrund dar.

VI. Literaturverzeichnis

- AMMON, L.: Die Gegend von München. - S.-A. Festschr. Geogr. Ges. München, 321 S., Taf. 1-6, Kt. 1, München (Theodor Ackermann) 1894.
- BIESKE, E.: Handbuch des Brunnenbaus. - 2, 1278 S., Taf. 1-25, Berlin (Rudolf Schmidt) 1965.
- BOGOMOLOV, G.W.: Grundlagen der Hydrogeologie. - 178 S., Taf. 1-18, Berlin (Dt. Verl. d. Wiss.) 1958.
- BUCHNER, F.: Das Sedimentgefüge im unteren Teil der Süßbrackwassermolasse Niederbayerns. - Abh. Bayer. Akad. Wiss. (Math. Naturw. Kl.) NF, 130, S. 1-76, München 1967.
- BRUNNACKER, K.,
PAULUS, B., BROCKERT, M.,
HINSCH, H. u. VIDAL, H.: Erläuterungen zur geologischen Karte von Bayern 1: 25 000, Nr. 7736, Ismaning. - 99 S., Taf. 1-9, Beil. 1-3, München (Bayer. Geol. Landesamt) 1964.
- DEHM, R.: Die Säugetierfauna in der Oberen Süßwassermolasse und ihre Bedeutung für die Gliederung. - Erl. Geol. Übers. Kt. Süddt. Molasse, S. 81-88, München (Bayer. Geol. Landesamt) 1955.
- DOLLMANN, H.D.: Auswertung der Ergebnisse der Grundwasserabsenkung zwischen Finauer- und Stengelstraße. - 68 S., Dipl. Arb. (Mskr.) am Lehrstuhl f. Grundbau u. Bodenmech. T.H., München 1966.
- EXLER, H.J.: Hydrogeologische Profile der V-Bahn-Trasse zwischen Haupt- und Ostbahnhof der Landeshauptstadt München. - Dt. Gewässerkundl. Mitt., SH, S. 101-111, Koblenz 1967.
- FÜCHTBAUER, H.: Zur Nomenklatur der Sedimentgesteine. - Erdöl und Kohle, 8, S. 605-613, Hamburg 1959.
- GERB, L.: Grundwassertypen. - Vom Wasser, Jb. Wasserchem. u. Wasserreinigungstechn., 25, S. 16-47, Weinheim 1958.
- GRIMM, W.D.: Schwermineralgesellschaften und Sand-schüttungen, erläutert am Beispiel der süddeutschen Molasse. - Abh. Bayer. Akad. Wiss. (Math. Naturw. Kl.) NF, 121, S. 1-135, München 1965.

- GÜMBEL, C.W.: Grundzüge für die Erforschung der geologischen Beschaffenheit des Bodens und Untergrunds vom Stadtgebiet Münchens. - 1. Ber. über Verh. u. Arb. d.v. Stadt-magistrate München niedergesetzten Comis. f. Wasserversorg., Canalisat. u. Abfuhr 210 S., München (E. Mühlthaler) 1875.
- HÖLL, K.: Untersuchung, Beurteilung und Aufbereitung von Wasser. - 235 S., Berlin (Walter de Gruyter) 1960.
- HOFBAUER, J.: Das Grundwasser in Bayern. - Gas- u. Wasserfach 107, H 18, S. 474-479, München 1966.
- KOEHNE, W.: Grundwasserkunde. - 314 S., Stuttgart (Schweizerbart'sche Verl. Buchhandl.) 1948.
- KNAUER, J.: Erläuterungen zur geologischen Karte von Bayern, 1: 25 000, Bl. München, Nr. 692. - 50 S., Taf. 1-5, München (Bayer. Oberbergamt) 1938.
- KRAUS, E.C.: Ein erstes, zusammenhängendes Pleistozän-Profil im Süden von München (Deisenhofner Forst - Isartal - Forstenriederpark). - Eiszeitalter u. Gegenwart, 15, S. 123-163, Taf. 1, Öhringen, 1964.
- MOSER, H.,
NEUMEIER, F. u.
RAUERT, W.: Über Anwendung radioaktiver Isotope in der Hydrologie. - Gas- und Wasserfach 106, H. 4, S. 85-91, München 1965.
- Über die Anwendung radioaktiver Isotope in der Grundwasser-Hydrologie. - Dt. Gewässerkundl. Mitt., SH, S. 136-140, Koblenz 1967.
- MÜLLER, G.: Methoden der Sedimentuntersuchung. - 1, 303 S., Taf. 1-2, Beil. 1-3, Stuttgart (Schweizerbart'sche Verl. Buchhandl.) 1964.
- MÜNICHSDORFER, F.: Das geologische Querprofil von München. - Geognost. Jh., 34, München 1922.
- LOCKER, F.W. u.
PISTERS, H.: Beurteilung und Untersuchung betonangreifender Wässer und Böden. - Zement-Taschenb., S. 345-377, Wiesbaden (Bauverl.) 1966/67.
- NEUMANN, R.: Geologie für Bauingenieure. - 784 S., Berlin-München (Wilhelm Ernst u. Sohn) 1964.

- PENK, A. u.
BRÜCKNER, E.: Die Alpen im Eiszeitalter. - 1, 393 S.,
Taf. 1-11, Kt. 1-8, Leipzig (Hans Tauchnitz)
1909.
- PETTIJOHN, F.J.: Sedimentary Rocks. - 718 S., New York
(Harper u. Brothers) 1949.
- RABIEN, A.: Zur Stratigraphie und Fazies des Oberdevons
in der Waldecker Hauptmulde. - Abh. Hess.
Landesamt f. Bodenforsch., 16, S. 7-83,
Wiesbaden 1956.
- REINECK, H.E.: Sedimentgefüge im Bereich der südlichen
Nordsee. - Abh. senkenb. naturw. Ges.,
505, S. 1-138, Frankfurt a.M. 1963.
- RICHTER, R.: Marken und Spuren im Hunsrückschiefer. -
2 Schichtung und Grundleben. - Senck. leth. -
18, S. 215-244, Frankfurt a.M. 1936.
- SANDER, B.: Einführung in die Gefügekunde der geologi-
schen Körper. - 1, 215 S., Wien u. Inns-
bruck (Springer) 1948.
- SARKÖZY, G.: U-Bahn für München. - Inform. 1, 6 S.,
München (Presse- u. Inform. Amt u. U-
Bahn-Ref. Landeshauptstadt München) 1966.
- U-Bahn für München. - Inform. 2, 6 S.,
München (Presse- u. Inform. Amt u.
U-Bahn-Ref. Landeshauptstadt München)
1967.
- SCHAEFER, J.: Über die Gliederung des Eiszeitalters. -
Eiszeit und Gegenwart, 1, S. 56-63,
Öhringen 1951.
- SCHIRM, E.: Die hydrogeologischen Verhältnisse der
Münchener Schotterebene östlich der Isar. -
160 S., Kt. 1-5, Diss. Univ. München (Bayer.
Landesstelle f. Gewässerk.) 1968.
- SCHULZE, E. u.
MUHS, H.: Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten. -
404 S., Berlin (Springer) 1950.
- SCHWILLE, F.: Ionenumtausch und der Chemismus von
Grund- und Mineralwässern. - Z. Dt. Geol.
Ges., 106, S. 16-22, Stuttgart 1954.
- Das Härte-Dreieck. - Gas- und Wasserfach,
98, H. 12, S. 1-3, München 1957.
- SIEMON, H.: Berechnung von Grundwasserabsenkungen
unter Berücksichtigung des Grundwasser-
haushalts. - 72 S., Taf. 1-8, Düsseldorf
(Ministerium f. Ernähr., Landwirtsch. u.
Forsten d. Landes Westfalen) 1958.

- STROMER, R.: Wirbeltiere im obermiozänen Flinz von München. - Abh. Bayer. Akad. Wiss., Math.-Naturw. Kl. 32, 1, München 1928
- Nachweis fossilführenden, untersten Pliozäns in München. - Abh. Bayer. Akad. Wiss., Math.-Naturw. Kl., NF, 42, S. 1-67, München 1937.
- Huftierreste aus den unterpliozänen Flinzsanden Münchens. - Abh. Bayer. Akad. Wiss., Math.-Naturw. Kl., NF, 44, S. 1-72, München 1938.
- Die jungtertiäre Fauna des Flinzes und des Schweißsand von München. - Abh. Bayer. Akad. Wiss., Math.-Naturw. Kl., NF, 48, S. 1-143, München 1940.
- SZECHY, K.: Der Grundbau. - 1, Untersuchung und Festigkeitslehre des Baugrundes. - 465 S., Wien (Springer) 1963.
- TERZAGHI, K. u. PECK, R. B.: Die Bodenmechanik in der Baupraxis. - 585 S., Berlin, Göttingen, Heidelberg (Springer) 1961.
- THIEM, A. Die Wasserversorgung der Stadt München. - Vorprojekt im Auftrage der beiden Gemeindecolliegen. - Anhang 1 zum 2. Ber. d. v. Stadtmagistrat niedergesetzten Comis. f. Wasserversorg., Canalisat. u. Abfuhr, 85 S., Pl. 1-15, München (E. Mühlthaler) 1876.
- TILLMANN, H.: Geologische-hydrologische Karte von München. 1: 50 000. - München (Bayer. Geol. Landesamt) 1953.
- TRAUB, F.: Hydrologische Übersichtskarte 1: 500 000, Bl. München mit Erl., - 121 S. Remagen (Amt f. Landeskd) 1956.
- TRUEB, E.: Hydrologische Interpretation von Temperaturbeobachtungen in Grundwasserströmen. - Schweizer. Z. Vermess. Kulturtechn. Photogramm, 7, S. 1-10, Zürich 1962.
- ZARUBA, G. u. MENCL, V.: Ingenieurgeologie. - 606 S., Berlin (Akad.-Verl.) 1961.
- ZIMNIOK, K.: Die Grundwasserverhältnisse beim U-Bahn-Bau in München. - Dt. Gewässerkundl. Mitt. SH, S. 94-100, Koblenz 1967.

- ZIMNIOK, K.: Schildvortrieb beim München U-Bahn-Bau. - Baumasch. u. Bautechn., 14, H. 5, S. 2-8, Wiesbaden-Berlin 1967.
- ZIMNIOK, K.,
CHAHBASIAN, G. u.
SARKÖZY, G.: U-Bahn-Bau in München. - 7 S., Dortmund (E. Arnold GmbH) 1966.
- ZIMNIOK, K., JOAS, H. u.
SARKÖZY, G.: U-Bahn für München. - N. Zürcher Ztg., Beil. Techn., 142, Nr. 3860, Zürich, 14. Sept. 1966.
- ZIMNIOK, K. und das
U-Bahn-Referat: Münchens U-Bahn und V-Bahn nehmen Gestalt an. - Bayerland, 11, S. 3-31, München Nov. 1967.

ANHANG

Verzeichnis der Tafeln

- Tafel 1: Streckenübersichtsplan der Münchner U-Bahn, der S-Bahn (früher V-Bahn) und des Vorortzugnetzes der Deutschen Bundesbahn. Stand März 1968 (nach ZIMNIOK, JOAS u. SARKÖZY 1967)
- Tafel 2: Schwermineralvergesellschaftung jungtertiärer Sedimente am Beispiel der Bohrung NS 650
- Tafel 3: Schrägschichtung in jungtertiären Fein-Mittelsanden (Baulos 2, Fig. a und b Bahnhof Alte Heide, früher Nordfriedhof)
- Tafel 4: Schichtinterne Fältelungserscheinungen in Mittelsanden des Jungtertiärs (Baulos 2)
- Tafel 5: Wühlgefüge in schluffigen bis stark schluffigen Feinsanden des Jungtertiärs (Baulos 2)
- Tafel 6: Zur Definition "Grundwasserstockwerke" (entnommen aus DIN 4094). Die Ziffern hinter den hydrologischen Begriffen geben die Gliederung der DIN 4049 wieder.
- Tafel 7: Hydrogeologisches Schemaprofil längs der Nord-Süd-Trasse nach den Ergebnissen der Erkundungsbohrungen
- Tafel 8: Bohrprofile der Erkundungsbohrungen auf der Ostseite des Bauloses 7 (Bahnhof Odeonsplatz)
- Tafel 9: Ganglinien von vier Grundwassermeßstellen längs der Nord-Süd-Trasse (14tägige Beobachtung durch die Stadtentwässerung)
- Tafel 10: Ganglinien der Monatsmittel des Isarwasserstandes (Pegel Prinzregentenbrücke) und der Monatssummen des Niederschlags (Meßstelle St. Bonifaz)
- Tafel 11: Ganglinien zweier Grundwassermeßstellen in der Schotterebene links der Isar (wöchentliche Beobachtung im Landesgrundwasserdienst der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde).
- Tafel 12: Monatliche Ganglinien der mit Schreibgeräten ausgerüsteten Grundwasserpegel NS 465, NS 427 und NS 327
- Tafel 13: Das zeitliche Auftreten der maximalen und minimalen Isarwasserstände, der Hoch- und Tiefstände von fünf langjährig beobachteten Grundwassermeßstellen und der maximalen und minimalen Monatssummen des Niederschlags.
- Tafel 14: Zur Definition der Grundwassergeschwindigkeiten (entnommen aus DIN 4049)
- Tafel 15: Pegelausbau, Bodenprofil, Filtergeschwindigkeiten und "lokale" Fließrichtungen in den Grundwasserpegeln E 2 und E 3
- Tafel 16: Pegelausbau, Bodenprofil, Filtergeschwindigkeiten und "lokale" Fließrichtungen in den Grundwasserpegeln NS 564 und H 1

- Tafel 17: Grundwasserhöhengleichen für den Grundwasserhochstand 1939 (nach einer Darstellung der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde).
- Tafel 18: Hydrogeologisches Profil und Grundwasserhöhengleichen längs der Nord-Süd-Trasse: Baulos 3, 1, 2 und 4
- Tafel 19: Hydrogeologisches Profil und Grundwasserhöhengleichen längs der Nord-Süd-Trasse: Baulos 6, 13 und 14
- Tafel 20: Hydrogeologisches Profil und Grundwasserhöhengleichen längs der Nord-Süd-Trasse: Baulose 18, 17, 9, 15 und 7
- Tafel 21
Fig. a: Vergleich der Grundwasserbewegungsrichtung (= Normale auf die Grundwasserhöhengleichen) mit, in Pegeln gemessenen, lokalen Fließrichtungen
- Fig. b: Tiefenlinienplan der Tertiäroberfläche und Darstellung der, in Pegeln gemessenen, lokalen Fließrichtungen.
- Tafel 22: Darstellung der Härtewerte von 30 Grundwasseranalysen aus dem Münchner Raum in Härtedreiecken. Zugleich wurde versucht, die Abhängigkeit der Chlorid- und Nitratgehalte von der Gesamthärte (GH) und der Sulfatgehalte von der Nichtkarbonathärte (NKH) in rechtwinkligen Systemen aufzuzeigen.
- Tafel 23: Pegelausbau, Bohrprofil und Temperaturprofil der Grundwassermeßstellen E 1 und E 2 (TMP = Temperaturmeßpunkt im Pegel).
- Tafel 24: Grundwassertemperatur-Ganglinien der Grundwassermeßstellen E 1 und E 2
- Tafel 25: Grundwasserganglinien der Grundwasserpegel im Bereich des Nordfriedhofs. Nach Beginn der Grundwasserabsenkung (25.5.65) fallen in allen Pegeln die Grundwasserstände.
- Tafel 26: Ganglinie des Wasserstandes in einem Privatbrunnen (Brauchwasser). Darunter sind die Monatssummen der Fördermengen des Brunnens dargestellt.
- Tafel 27: Erosionserscheinungen im Flinzsand im Bereich des Bauloses 6, Bahnhof Universität
- Tafel 28: Hydrogeologisches Profil im Bereich des Tunnel 1 im Baulos 6 (Ausschnitt)
- Tafel 29: Hydrogeologisches Profil im Bereich des Tunnel 3 im Baulos 6
- Tafel 30: Erosionskavernen beim Schildvortrieb (Tunnel 3 und 4 im Baulos 6)
- Tafel 31: Vakuumwasserhaltung im Baulos 6, südliche Tunnelstrecke, Tunnel 3
- Tafel 32: Horizontalbohrung im Baulos 6, südliche Tunnelstrecke
- Tafel 33: Tagesmittel und Monatssummen der Leistung der Brunnen 7 und 25 im Baulos 10

- Tafel 34: Mittlere Leistungen (14.3.-31.11.1967) der Absenkbrunnen
im Baulos 10 nach einem Plan der Fa. J. Keller
- Tafel 35: "Absenkdiagramm" Baulos 1
- Tafel 36: "Absenkdiagramm" Baulos 2
- Tafel 37: "Absenkdiagramm" Baulos 3
- Tafel 38: "Absenkdiagramm" Baulos 4
- Tafel 39: "Absenkdiagramm" Baulos 6
- Tafel 40: Grundwasserbeobachtungspegel

Richtlinien für die Bodenansprache und Darstellung der Ergebnisunterlagen

Die Voraussetzung für eine geologische und hydrologische Auswertung der Bohrungen sind untereinander vergleichbare Bohrprofile. Deshalb ist es notwendig, daß die Hauptbodenarten von allen Bauführern der am Bohrprogramm beteiligten Bohrfirmen richtig und in gleicher Weise benannt werden.

Diese Bezeichnungen sind in Schichtenverzeichnissen (Vordruck nach DIN 4022) einzutragen.

Die Kopfblätter der Schichtenverzeichnisse sind vollständig auszufüllen. Insbesondere sind hier die Höhenkoten anzugeben.

Die Schichtenverzeichnisse werden vom U-Bahn-Referat mit den vorzuhaltenden Bohrkernen verglichen und gegebenenfalls korrigiert. Es empfiehlt sich daher ein vorläufiges Schichtverzeichnis bei der Abnahme der Bohrung zur Überprüfung vorzulegen. Außerdem werden auch die ungestörten Bohrproben stichprobenartig kontrolliert.

Die Grundlage der Bohrprobenansprache sind die DIN-Normen 4022 und 4023.

Die bisherigen Untersuchungen und Erfahrungen zeigen, daß die natürlichen Gegebenheiten im wesentlichen durch nachstehendes Benennungsschema wiedergegeben werden können. Es gelten die in der DIN 4022 genannten Korngrößen Grenzen. Die häufig vorkommenden Bodenarten sind unterstrichen.

Quartär: Auffüllung (Kies, sandig, Bauschutt etc.)

Fein- bis Mittelkies, sandig

Fein- bis Grobkies, sandig, Stein bis . . . cm

Obige Kiese, schluffig, sandig

Obige Kiese, sandarm bis frei (Rollkies)

Fein-Mittelsand, schluffig

Schluff, tonig, sandig (Lehm)

Tertiär: Mittelsande (schwach feinsandig, schwach schluffig)
 Fein-Mittelsand (schwach schluffig bis schluffig)
 Feinsand, schluffig (bis stark schluffig)
 Schluff, sandig (schwach tonig)
 Schluff, sandig, tonig
 Schluff, tonig (bis stark tonig)
 Ton, schluffig (bis stark schluffig)
 Fein-Mittelkies, sandig (Quarzkies)

Diese Bodenarten können durch diagenetische oder deszendente Kalklösungen teilweise und unregelmäßig verfestigt sein:

Verfestigter Kies: Konglomerat (Nagelfluh)
Verfestigter Sand: Sandstein
Verfestigter Schluff: Mergelstein

In den Schichtenverzeichnissen sind außer den Angaben über Farbe, Festigkeit (beim Bohren) und Feuchtigkeit oder Wasserführung der Schichten auch sämtliche Besonderheiten zu vermerken, wie z. B.:

Kalkkonkretionen,
Limonitische Verbackungen
Glimmergehalt
Fossilien

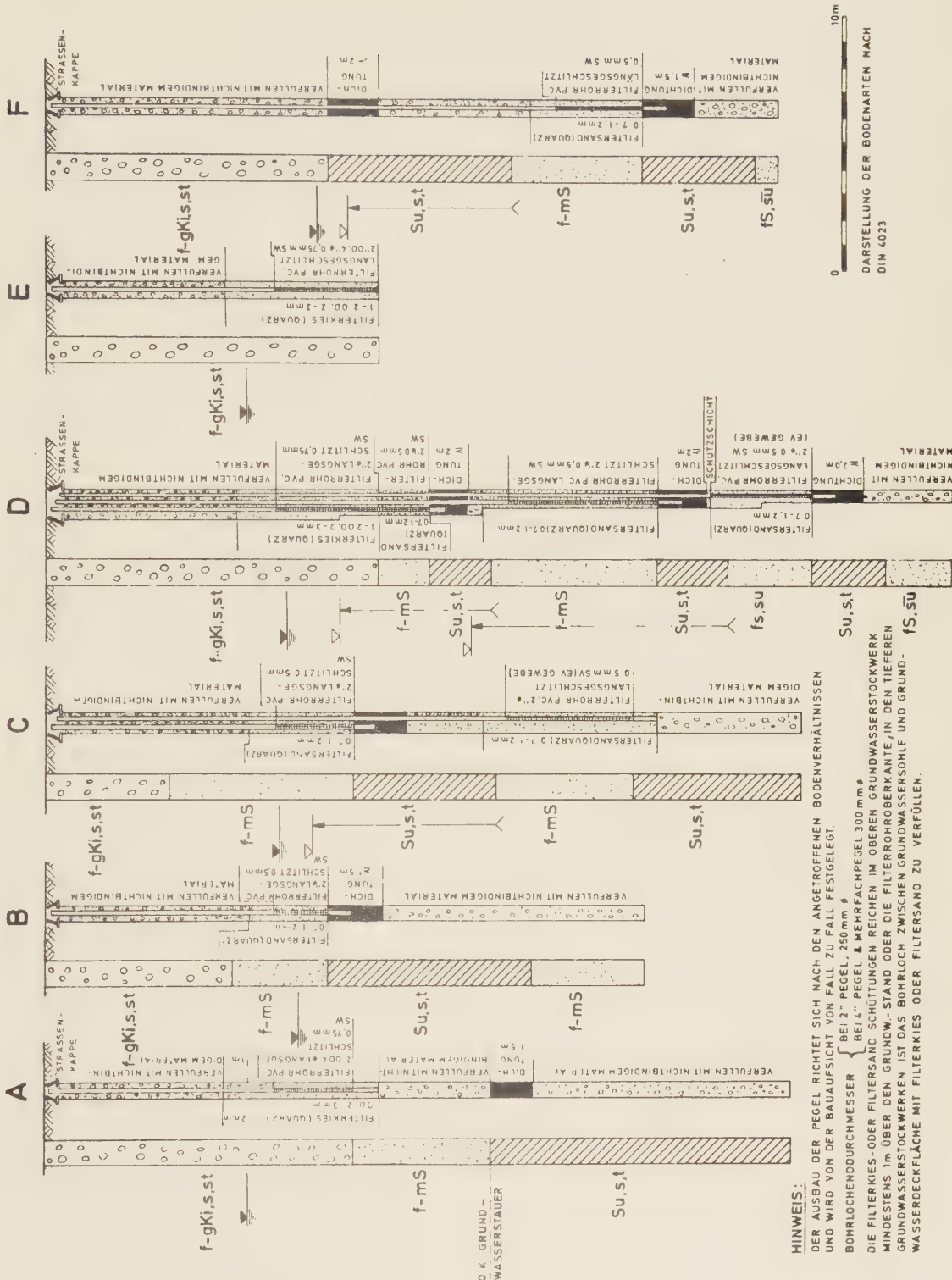
Besondere Aufmerksamkeit ist dem Verhalten des Grundwasserstandes im Bohrloch zu widmen, der täglich in der Frühe und am Abend einzumessen ist. Alle Änderungen (erstes Antreffen des Grundwassers in der Bohrung, Fallen oder Ansteigen des Grundwassers bei Erreichen bestimmter Tiefen, Ruhewasserspiegel nach beendigter Bohrung etc.) sind im Schichtenverzeichnis, in Bohrberichten und in den Tagesberichten zu vermerken. Der Bohrlochausbau zum Pegel wird erst auf Grund der Bohrberichte durch das U-Bahn-Referat festgelegt. Beispiele für verschiedene mögliche Arten des Pegelbaus sind in Tafel 40 dargestellt.

Außerdem ist in den Schichtenverzeichnissen auch die Spalte "übliche Benennung" durch folgende Begriffe auszufüllen:

BEOBSACHTUNG DER GRUNDWASSEROBER-
FLÄCHEN IN OBEREN GRUNDWASSERSTOCK-
WERKEN

BEOBSACHTUNG DER GRUNDWASSEROBERFLÄCHEN
ODER DRUCKSPEIGEL MEHRERER GRUNDWASSER-
STOCKWERKE

BEOBSACHTUNG DER GRUND-
WASSEROBERFLÄCHE IM
QUARTÄREN SCHOTTER



Tafel 40 Grundwasserbeobachtungspegel

im Quartär

{
Auffüllung
Kies - Sand (Schotter)
Lehm

im Tertiär

{
Flinzsand
Flinzmergel

Zeichnerische Darstellung

Die Bohrprofile sind auf DIN A 4 im Maßstab 1 : 100 als Schichtsäulen nach DIN 4023 darzustellen.

Die Bohrprofile müssen folgende Angaben enthalten:

- | | |
|--|---|
| 1. Bezeichnung der Bohrung | 9. Grenze Quartär - Tertiär |
| 2. Bohrfirma | 10. Grundwassereintritt und Ruhewasserspiegel nach beendiger Bohrung in Metern unter Gelände <u>und</u> bezogen auf NN <u>mit Datum</u> |
| 3. Datum | |
| 4. Maßstab | 11. Geländeoberkante bezogen auf NN |
| 5. Bodenart oder Gesteinsart | 12. Entnahmetiefe ungestörter Bodenproben |
| 6. Farbe | |
| 7. Schichtmächtigkeit | |
| 8. Tiefe der Schichtunterkante in Metern unter Gelände <u>und</u> bezogen auf NN | |

Der Pegelausbauplan ist im Vertikalmaßstab 1 : 100 (Horizontalmaßstab 1 : 50) neben das Bohrprofil auf dasselbe Blatt zu zeichnen. Sämtliche Ausbaudaten sind einzutragen:

- | | |
|-------------------------|----------------------------------|
| 1. Straßenkappe | } <u>in Metern unter Gelände</u> |
| 2. Pegeloberkante | |
| 3. Pegelunterkante | |
| 4. Filterrohroberkante | |
| 5. Filterrohrunterkante | |
| 6. Filterkiesoberkante | |
| 7. Filterkiesunterkante | |

8. Filterrohrmaterial
9. Filterrohrfabrikat
10. Filterrohrdurchmesser (Zoll)
11. Filterrohrschlitzweite (mm)
12. evtl. Gewebe (Material und Maschenweite)
13. Aufsatzrohr- und Sumpfrohrmaterial
14. Filterkieskrönung
15. Filterkiesmaterial
16. Bohrdurchmesser (mm)
17. Auffüllungsmaterial

Die Angaben in den Bohrprofilen und Ausbauplänen müssen mit denen im Schichtverzeichnis und selbstverständlich auch mit der Wirklichkeit übereinstimmen.

Die Bohrungen sind in einem DIN A 4-Lageplan 1 : 1 000 einzutragen und gegen feste Punkte oder Fluchten rechtwinklig zu vermaßen (keine Zäune, keine Randsteine, keine Bäume). Die Lagepläne müssen mindestens zwei Straßennamen und die Hausnummern derjenigen Häuser enthalten, auf die sich die Vermaßung bezieht.

Sämtliche Unterlagen (in der Reihenfolge zusammengeheftet: Lageplan, Schichtverzeichnis mit Kopfblatt, Bohrprofile mit Ausbauplan) sind in 4facher Ausfertigung spätestens 10 Tage nach Fertigstellung der Bohrung beim U-Bahn-Referat einzureichen.

Lebenslauf

Am 26. Februar 1937 wurde ich als Sohn des Prof. Dr. med. Karl Gebhardt und seiner Frau Marianne Gebhardt, geb. Hess, in Berlin geboren. Nach Beendigung meiner Schulzeit mit der Reifeprüfung an der Gisela-Oberrealschule in München begann ich im Wintersemester 1958/59 das Studium an der Ludwig-Maximilians-Universität in München. Im Mai 1961 legte ich die Diplomvorprüfung für das Fach Geologie ab. Die Diplomhauptprüfung bestand ich im Juli 1964.

Nach meinem Studienabschluß arbeitete ich im Rahmen einer Forschungsaufgabe der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde, München, an der Erstellung von Grundwasserkarten mit. Im Oktober 1965 begann ich meine Doktorarbeit bei Herrn Prof. Dr. F. Neumaier, München.

Ab Februar 1966 war ich wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde im Rahmen eines Forschungsauftrags der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Seit September 1966 bin ich Angestellter der Landeshauptstadt München (U-Bahn-Referat).



